UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

PROGRAMACIÓN DEL RIEGO EN ROSA (*ROSA SP*) VARIEDAD VENDELA EN SUSTRATO, POR EVAPOTRANSPIRACIÓN Y PORCENTAJE DE DRENAJE, EN LA SABANA DE BOGOTÁ

JORGE ANDRÉS VALENCIA MÉNDEZ

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2016

PROGRAMACIÓN DEL RIEGO EN ROSA (*ROSA SP*) VARIEDAD VENDELA EN SUSTRATO, POR EVAPOTRANSPIRACIÓN Y PORCENTAJE DE DRENAJE, EN LA SABANA DE BOGOTÁ

JORGE ANDRÉS VALENCIA MÉNDEZ

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Agrícola

Director:

Ph.D. JAVIER ENRIQUE VÉLEZ SÁNCHEZ

Codirector:

MSc. JOHN JAIRO ARÉVALO HERNÁNDEZ

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Agrícola

Bogotá, Colombia

2016

Dedicado

A Dios, por darme la fortaleza y determinación para llegar a este punto.
A mi abuelo y abuela, que desde el cielo me enviaron la mejor energía.
A mis padres y abuela por su apoyo.

Agradecimientos

- Mi más sincero agradecimiento al grupo empresarial de The Elite Flower por la oportunidad y la confianza que depositaron en mí, para la realización de la investigación.

- A mi director, Doctor. Javier Enrique Vélez por su constante apoyo y enseñanzas durante la realización de este trabajo.

- A mi co-director, MSc. John Jairo Arévalo Hernández, por su constante apoyo, revisión y asesoría, durante la elaboración del proyecto.

- A los auxiliares de riego y operarios del bloque 2B de la finca Santa María, por su paciencia y colaboración en todo momento.

- A los laboratoristas de la Universidad Nacional de Colombia, que me brindaron su colaboración durante la ejecución del proyecto.

- A la Universidad Nacional de Colombia por permitirme realizar esta investigación, y contribuir en mi crecimiento profesional y personal.

Resumen

Se realizó un experimento en un cultivo de rosa (*Rosa sp*) variedad Vendela en sustrato bajo invernadero en la Sabana de Bogotá, en dos ciclos de cultivo durante el año 2014. Fue evaluada la producción y calidad de la cosecha, con tres láminas de riego, un tratamiento control (T1) equivalente al 100% con base en la evapotranspiración de cultivo (ETc) y el porcentaje de drenaje (%D), un T2 y T3 equivalentes al 80% y 65% del T1, respectivamente. En la determinación del volumen total de riego, el valor del coeficiente de cultivo (Kc) y el porcentaje de área de la planta (%A) se mantuvo constante durante el ensayo, mientras que la eficiencia de riego (η), la evapotranspiración de referencia (ETo) y el porcentaje de drenaje (%D) variaron. En todos los tratamientos se monitoreó el estado hídrico del suelo y de la planta. La producción de tallos florares, diámetro y longitud del botón, y área foliar no presento diferencias significativas ($p<0.05$) de acuerdo a la prueba de Duncan, sin embargo el T1 tuvo la mayor cantidad de tallos. La longitud y diámetro del tallo, coeficientes de cultivo Kc y la eficiencia en el uso del agua (EUA) presento diferencias significativas ($p<0.05$) de acuerdo a la prueba de Duncan entre tratamientos. A partir de los parámetros obtenidos de la curva presión-volumen se determinó que las plantas de rosa (*Rosa sp*) variedad Vendela, no realizaron ajuste osmótico y elástico. Los volúmenes de agua aplicada en los tratamientos no afecto el estado hídrico de las plantas.

Palabras clave: producción de rosa, calidad, riego deficitario, sustrato**.**

Abstract

An experiment was conducted on a crop of roses (*Rosa sp*), Vendela variety, cultivated in a substrate inside a greenhouse on the Sabana de Bogotá for two crop cycles during 2014. The production and quality of the harvest were evaluated under three irrigation regiments: a control treatment (T1), equivalent to 100% of the evapotranspiration of the crop (ETc) and the drainage percentage (%D); T2, which was 80% of the control; and T3, which was 65% of the control. The total irrigation volume, the coefficient value of the crop (Kc) and the plant area percentage (%A) remained constant during the experiment; on the other hand, the irrigation efficiency (η), the reference evapotranspiration (ETo) and the drainage percentage (%D) varied. The water status of the soil and the plants was monitored in all of the treatments. There were no significant differences ($p < 0.05$) in the production of flowering stems, in the diameter and length of the bud, or in the leaf area according to Duncan's test; however, TI had the largest amount of shoots. In contrast, there were significant differences ($p < 0.05$) for the length and diameter of the stems, the crop coefficients (Kc) and the water use efficiency (WUE) according to Duncan's test. The parameters obtained from the pressure-volume curve led to the conclusion that the rose plants (Rosa sp), Vendela variety, did not perform an osmotic or elastic adjustment. The volume of water applied in the treatments did not affect the water status of the plants.

Keywords: rose production, quality, irrigation deficiency, substrate**.**

Contenido

Pág.

1. Marco conceptual 5
1.1 El agua 5
1.1.1 Déficit Hídrico en las plantas 6
1.2 Características generales del cultivo 8
1.2.1 Rosa 8
1.2.2 Fenología de la rosa 9
1.2.3 Características taxonómicas de la *Rosa sp* 9
1.2.4 Requerimientos edafoclimáticos 10
1.2.5 Plagas y enfermedades 11
1.2.6 Efectos de la salinidad en el sustrato y agua de riego 12
1.2.7 Crecimiento y desarrollo 13
1.3 Continuo sustrato - planta – atmósfera 14
1.3.1 El sistema sustrato-agua 16
1.3.2 Sustrato 18
1.3.3 Condición hídrica del sustrato 20
1.3.4 Fertirriego 21
1.4 Requerimientos hídricos de los cultivos 22
1.4.1 Evapotranspiración 23
1.4.2 Coeficiente del cultivo (kc) 25
1.4.3 Condición hídrica de la planta 26

2. Materiales y métodos 29
2.1 Características del área de estudio 29
2.1.1 Localización 29
2.1.2 Clima 29
2.1.3 Material vegetal 30
2.1.4 Riego 30
2.1.5 Sustrato 31
2.1.6 Diseño Experimental 37
2.1.7 Manejo del riego 38
2.2 Métodos y técnicas utilizadas 39
2.2.1 Requerimientos hídricos del cultivo 39
2.2.2 Condición hídrica del sustrato 42
2.2.3 Condición hídrica de la planta 43
2.2.4 Datos climáticos y grados días de crecimiento (GDC) 48
2.2.5 Determinación del área foliar 49
2.2.6 Calidad cosecha y crecimiento del cultivo 50
2.2.7 Producción de tallos florales 51
2.2.8 Eficiencia en el uso del agua (EUA) 51

2.2.9 Incidencia de plagas y enfermedades 52
2.2.10 Parámetros de riego 52
2.2.11 Análisis estadístico 53

3. Resultados y discusión 54
3.1 Propiedades hidrofísicas del sustrato 54
3.1.1 Distribución granulométrica 54
3.1.2 Densidad real, aparente y porosidad total 55
3.1.3 Curva de retención de humedad 57
3.1.4 Conductividad hidráulica saturada 59
3.2 Variables climáticas 59
3.2.1 Evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) y del cultivo (ETc) 59
3.2.2 Condiciones ambientales dentro del invernadero 60
3.2.3 Acumulación de grados día de crecimiento (GDC) 61
3.3 Volumen de agua aplicada 62
3.4 Volumen drenado 64
3.5 Balance hídrico y coeficiente de cultivo calculado (Kc) 66
3.6 Condición hídrica del sustrato 67
3.6.1 Potencial matricial del sustrato (Ψs) 67
3.7 Condición hídrica de la planta 68
3.7.1 Potencial hídrico al tallo (Ψt) 68
3.7.2 Curva presión volumen 72
3.8 Parámetros de crecimiento 74
3.8.1 Área foliar (AF) 74
3.8.2 Crecimiento de tallo y botón 75
3.9 Producción de tallos florales 88
3.10 Calidad cosecha 89
3.11 Eficiencia en el uso del agua (EUA) 91
3.12 Parámetros de riego 92
3.12.1 Conductividad Eléctrica (CE) 92
3.12.2 pH 93
3.12.3 Contenido de nitratos (N-NO3) 95
3.13 Incidencia de plagas y enfermedades 96

4. Conclusiones 98

5. Bibliografía 100

Lista de figuras

Pág.

Figura 1-1 Curvas de retención de humedad para sustratos usados comercialmente (Fonteno, 1999). 17
Figura 1-2 Esquema básico para un sistema de tipo abierto en cultivos sin suelo (Cuervo *et al.,* 2011). 22
Figura 1-3 Evapotranspiración (evaporación y transpiración) durante el tiempo de crecimiento de un cultivo. Tomado de (Allen *et al.,* 2006). 24
Figura 1-4 Intervalos usuales esperados del factor kc para las cuatro etapas de crecimiento. Tomado de (Esmeral, 2011). 25
Figura 2-1 Ubicación geográfica Finca Santa María en el municipio de Facatativá (Cundinamarca). 29
Figura 2-2 Cultivo de Rosa sp, variedad Vendela. 30
Figura 2-3 Reservorio y electrobombas con tuberías de succión y descarga. 31
Figura 2-4 Juego de tamices. 32
Figura 2-5 Picnómetro 33
Figura 2-6 Probeta con sustrato. 34
Figura 2-7 Montaje de las muestras de sustrato en la olla de baja presión. 35
Figura 2-8 Toma de muestra para CHS. 36
Figura 2-9 Montaje en laboratorio para determinar CHS 36
Figura 2-10 Esquema general distribución de tratamientos 38
Figura 2-11 Controlador de riego Galileo WEX. 38
Figura 2-12 Atmómetro. 39
Figura 2-13 Calibración del tensiómetro 43
Figura 2-13 Embolsado de la hoja antes de realizar el ensayo 44
Figura 2-14 Cámara de presión con una hoja lista para medición del ψt 44
Figura 2-15 Determinación del potencial hídrico en hojas saturadas (A), y peso fresco (B). 45
Figura 2-16 Determinación del potencial hídrico en hojas saturadas (A), y peso fresco (B).
Figura 2-17 Esquema del seguimiento a hojas durante el proceso de deshidratación y medición del potencial hídrico 46
Figura 2-18 Parámetros hídricos de la Curva presión –volumen 48
Figura 2-19 Sensor WatchDog para registro de temperatura y humedad relativa. 49
Figura 2-20 Scanner para medir área foliar. 50
Figura 2-21 Marcación de tallos vegetativos para seguimiento del primer ciclo. 51
Figura 2-22 Medidor Horiba. 53
Figura 2-23 Combo Hanna 53
Figura 3-1 Curva de retención de humedad antes de iniciar los tratamientos, y con los tratamientos establecidos. 57
Figura 3-2 Evapotranspiración del cultivo de referencia, ETo, del cultivo, ETc, y evapotranspiración de cultivo del lisímetro, ETi, para los tres tratamientos 60

Figura 3-3 Comportamiento semanal medio de la temperatura (T°C), humedad relativa (HR%) y déficit de presión de vapor (DPV). 61
Figura 3-4 Comportamiento de la acumulación grados día de crecimiento (GDC) de los tallos florales en los dos ciclos medidos. 62
Figura 3-5 A) Volumen de riego aplicado en litros cama^{-1} semana^{-1}, B) evapotranspiración del cultivo (ETc) en mm semana^{-1}. 63
Figura 3-6 Lámina de riego acumulada. 64
Figura 3-7 Fluctuación del porcentaje de drenaje (%D) en el rango correspondiente al factor de corrección (30-50%). 66
Figura 3-8 Potencial hídrico al tallo en los tratamientos de riego. El * indica diferencia significativa de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05) 69
Figura 3-9 Fluctuación del potencial hídrico al tallo (Ψt) y el déficit de presión de vapor (DPV). 70
Figura 3-10 Curva presión- volumen y ecuación de ajuste por tratamientos de riego. 72
Figura 3-11 Área foliar en los tratamientos de riego. 74
Figura 3-12 Curva de crecimiento del tallo floral, primer ciclo, A) longitud y B) diámetro. El * indica diferencia significativa de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05). 76
Figura 3-13 Curva de crecimiento del tallo floral, semanas 35 a la 43, A) Tasa absoluta de crecimiento (TAC) y B) Tasa relativa de crecimiento (TRC). 78
Figura 3-14 Curva de crecimiento del tallo floral, segundo ciclo, A) longitud y B) diámetro. El * indica diferencia significativa de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05) 79
Figura 3-15 Curva de crecimiento del tallo floral, semanas 39 a la 47, A) Tasa absoluta de crecimiento (TAC), B) Tasa relativa de crecimiento (TRC). 81
Figura 3-16 Curva de crecimiento del botón, primer ciclo, A) longitud y B) diámetro. El * indica diferencia significativa de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05) 83
Figura 3-17 Curva de crecimiento del botón, semanas 35 a la 43, A) Tasa absoluta de crecimiento (TAC) y B) Tasa relativa de crecimiento (TRC). 84
Figura 3-18 Curva de crecimiento del botón, segundo ciclo, A) longitud y B) diámetro. El * indica diferencia significativa de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05). 86
Figura 3-19 Curva de crecimiento del botón, semanas 39 a la 47, A) Tasa absoluta de crecimiento (TAC) y B) Tasa relativa de crecimiento (TRC). 87
Figura 3-20 Producción semanal de tallos florales en los tratamientos de riego. El * indica diferencia significativa de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05). 89
Figura 3-21 Longitud de los tallos florales por tratamiento. 91
Figura 3-22 Eficiencia en el uso del agua en los tratamientos de riego 92
Figura 3-23 Comportamiento de la conductividad eléctrica (CE) en A) emisor, B) sustrato y C) lixiviado. 93
Figura 3-24 Comportamiento del pH en A) emisor, B) sustrato y C) lixiviado. 94
Figura 3-25 Comportamiento de nitratos (N-NO3) en A) emisor, B) sustrato y C) lixiviado. 96

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1-1 Clasificación taxonómica del cultivo de rosa (*Rosa sp*)..... 10
Tabla 1-2 Principales plagas de rosa..... 12
Tabla 1-3 Principales enfermedades de rosa. 12
Tabla 3-1 Fracciones granulométricas obtenidas antes de iniciar y durante los tratamientos T1, T2 y T3. Valores con la misma letra indican que no hubo diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05). 54
Tabla 3-2 Valores medios de densidad real, densidad aparente y porosidad total antes de iniciar y durante los tratamientos T1, T2 y T3. Valores con diferente letra indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05). 55
Tabla 3-3 Valores obtenidos para el agua total disponible (ATD), fácilmente disponible (AFD) y de reserva (AR) antes y durante los tratamientos T1, T2 y T3. Valores con la misma letra indican que no se presentaron diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05)..... 58
Tabla 3-4 Lámina de agua aplicada (LA), drenada (LD) y porcentaje de drenaje (%D). . 65
Tabla 3-5 Evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo), del lisímetro (ETi) y coeficiente de cultivo calculado (Kc)..... 67
Tabla 3-6 Potencial matricial del sustrato (Ψs). 68
Tabla 3-7 Matriz de correlación de Pearson para T1, entre las variables de potencial hídrico al tallo (Ψt), déficit de presión de vapor (DPV) y área foliar..... 71
Tabla 3-8 Matriz de correlación de Pearson para T2, entre las variables de potencial hídrico al tallo (Ψt), déficit de presión de vapor (DPV) y área foliar..... 71
Tabla 3-9 Matriz de correlación de Pearson para T3, entre las variables de potencial hídrico al tallo (Ψt), déficit de presión de vapor (DPV) y área foliar..... 71
Tabla 3-10 Parámetros obtenidos a partir de la curva presión-volumen: Contenido hídrico foliar (CHf), potencial osmótico saturado (Ψos), contenido relativo de agua en el punto de perdida de turgencia (CRAppt), contenido relativo de agua apoplástica (CRAa), potencial osmótico en el punto de pérdida de turgencia (Ψoppt) y elasticidad máxima (Єmax). Letras diferentes indican diferencias significativas (p<0,05), según prueba de Duncan.. 73
Tabla 3-11 Ecuaciones del modelo logístico para la longitud del tallo; semana 35 a la 43. 77
Tabla 3-12 Ecuaciones del modelo logístico para la longitud del tallo; semana 39 a la 47. 80
Tabla 3-13 Estadios fenológicos para *Rosa sp.* Vendela, en función del diámetro del botón; semana 38 a 43. Valores con diferente letra indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05). 85
Tabla 3-14 Estadios fenológicos para *Rosa sp.* Vendela, en función del diámetro del botón; semana 42 a 47. Valores con diferente letra indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05). 88
Tabla 3-15 Longitud y diámetro del tallo y del botón. Valores con letras iguales indican que no hubo diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05)..... 90

Tabla 3-16 CE en emisor, sustrato y lixiviado; semana 35 a 48. Valores con letras iguales indican que no hubo diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05). 92
Tabla 3-17 pH en emisor, sustrato y lixiviado; semana 35 a 48..... 94
Tabla 3-18 N-NO3 en emisor, sustrato y lixiviados; semana 35 a 48. 95

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
CO_2	Dióxido de Carbono	ppm
CE	Conductividad eléctrica	dS m^{-1}
DPV	Déficit de presión de vapor	kPa
GDC	Grados día de crecimiento	°C-día
HR	Humedad relativa	%
T	Temperatura	°C
CRA	Contenido relativo de agua	%
CHf	Contenido hídrico foliar	
CRAa	Contenido relativo de agua apoplástica	%
CRAs	Contenido relativo de agua simplástica	%
CRAppt	Contenido relativo de agua en el punto de pérdida de turgencia	%

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
Ψ	Potencial hídrico	MPa
Ψ_f	Potencial hídrico foliar	
Ψs	Potencial matricial del sustrato	KPa
Ψ_t	Potencial al tallo	MPa
Ψos	Potencial osmótico saturado	MPa
Ψoppt	Potencial osmótico en punto de pérdida de turgencia	MPa
ε	Módulo de elasticidad	MPa

Abreviaturas

Abreviatura	Término
TAC	Tasa absoluta de crecimiento
TRC	Tasa relativa de crecimiento
AF	Área foliar
EUA	Eficiencia en el uso del agua
ETc	Evapotranspiración de cultivo
ETo	Evapotranspiración del cultivo de referencia
ETi	Evapotranspiración de cultivo del lisímetro
Kc	Coeficiente de cultivo
Kc	Coeficiente de cultivo calculado
CRH	Curva de retención de humedad
AR	Agua de reserva
AFD	Agua facílmente disponible
ATD	Agua total disponible
DTP	Distribución de tamaño de partículas
PT	Porosidad total
CAQ	Cascarilla de arroz quemada
%D	Porcentaje de drenaje
FCD	Factor de corrección del porcentaje de drenaje
dr	Densidad real
da	Densidad aparente
wg	Humedad gravimétrica
wv	Humedad volumétrica
ks	Conductividad hidráulica saturada

Introducción

Dada la problemática del agua como recurso natural no renovable, y de su continua explotación, es necesario optimizar su utilización. Para 2050 la agricultura continuara como el mayor consumidor de agua a nivel mundial, y representa el 70% o más, requiriendo de tecnologías innovadoras e inversión en la búsqueda de prácticas que mejoren la gestión del recurso hídrico (FAO, 2015). La agricultura tiene tres opciones de gestión sobre la demanda total de agua: Reducir las pérdidas, aumentar la productividad y redistribuirla, resaltando que en la mayoría de los casos la única forma de gestionar la demanda es a través del aumento de la productividad (FAO, 2013).

En Colombia, el uso eficiente del agua está reglamentado por la Ley 373 de 1997, mediante el programa “uso eficiente y ahorro del agua”, basado en el diagnóstico de la oferta hídrica de las fuentes de abastecimiento, la demanda, y mantener las metas anuales de reducción de pérdidas, buscando generar alternativas y reglamentar su uso en el país (MADS, 1997).

En la producción de flores es evidente un elevado consumo de agua, en la sabana de Bogotá, se estima en 50 millones de m^3 $año^{-1}$, con una aplicación media de 800 litros $cama^{-1}$ $semana^{-1}$. La floricultura en Colombia se encuentra en el primer lugar de las exportaciones no tradicionales, generando 130.000 empleos formales directos e indirectos en aproximadamente 7000 hectáreas, en 60 municipios, representando ingresos por un valor de USD 1374 millones (ASOCLOFLORES, 2014). Después de Holanda, que representa el 45.2% de la participación en las exportaciones de flor fresca cortada, Colombia es el mayor exportador a nivel mundial, con una participación del 15.8% en 2013 (ASOCOLFORES, 2015). Las mayores regiones productoras de flores en Colombia son Cundinamarca, Antioquia, Eje cafetero, Boyacá y Córdoba con el 73.2, 23.8, 1.9, 1.0 y 0.1% respectivamente, el cultivo de rosa tiene la mayor área sembrada por especie de flor con 2465 ha, y representó el mayor porcentaje de participación por especie de las exportaciones en 2014 con un 27% (ASOCOLFORES, 2015).

El cultivo de rosa en suelo, bajo invernadero, es el método más utilizado en la sabana de Bogotá, seguido del sustrato o sin suelo, en cascarilla de arroz quemada (CAQ), cascarilla de arroz cruda (CAC) y mezclas de las anteriores (Quintero, 2009).

La mayor producción de flores de las empresas ubicadas en la Sabana de Bogotá se da en suelo, sin embargo se ha ido sustituyendo por sustrato. El riego es realizado generalmente con la aplicación de fertilizantes mediante goteo, de acuerdo a los requerimientos. En sistemas abiertos en suelo o sustrato, es frecuente el vertimiento de los residuos al medio ambiente, en los sistemas de producción cerrados los lixiviados se reutilizan a través de un sistema de recirculación (Barrientos *et al.*, 2011). Las necesidades de riego están referidas tanto a la cantidad de agua como al momento de su aplicación, buscando compensar la evapotranspiración, la cual varía conforme al estado de desarrollo del cultivo (Beltri, 2008). Manejar eficientemente la aplicación del agua reduciendo el aporte durante el ciclo del cultivo sin afectar la calidad y producción, es el propósito de la programación del riego teniendo en cuenta la relación suelo-planta-clima (Intrigliolo, 2011).

Una reducción de agua, además de generar un ahorro de agua, permite controlar el desarrollo de las plantas, preservando su valor ornamental (Álvarez, S. 2011). Sin embargo el estrés hídrico en los cultivos afecta el crecimiento y la productividad, pero con diferentes y complejos mecanismos para reaccionar ante la escasez de agua, varios cultivos y genotipos han desarrollado grados de tolerancia a la sequía con crecimiento compensatorio. La mayor productividad para variedades de alto rendimiento se consigue, con el suministro óptimo de agua y niveles de fertilidad de suelos adecuados, pero en condiciones limitantes en el suministro de agua, el cultivo se adaptará al estrés hídrico y podrá producir con menos agua (FAO, 2002).

Existen diferentes mecanismos que permiten establecer el estado hídrico de las plantas, medidas directas e indirectas, las directas tienen como principales ventajas la capacidad de suministrar información en tiempo real, para la programación automática del riego y diagnóstico de déficit hídrico; destacándose en los indicadores de medida discontinua el potencial hídrico foliar (Ψ_f), potencial hídrico del tallo (Ψ_t), conductancia estomática (g_s) (y fotosíntesis, y en los de continua el flujo de savia, fluctuaciones del diámetro del tronco y termografía de infrarrojos (Torrecillas, 2011a).

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el efecto sobre la producción y calidad del cultivo de rosa (Rosa sp) variedad Vendela sembrada en sustrato, de la aplicación de diferentes láminas de riego, calculadas a partir de la evapotranspiración del cultivo,

utilizando un atmómetro; midiendo el estado hídrico de la planta y el sustrato, y calculando la eficiencia del agua aplicada.

Como resultado de esta investigación se busca recomendar una lámina que represente un ahorro de agua y fertilizante, contribuyendo a mitigar el impacto ambiental, con una programación eficiente del riego, garantizando el desarrollo normal del cultivo, para la producción de tallos florales tipo exportación.

Objetivos

General

Evaluar el efecto de tres láminas de riego en *Rosa sp.* variedad Vendela en sustrato, en base a la evapotranspiración y porcentaje de drenaje, en invernadero en la Sabana de Bogotá.

Específicos

- ✓ Caracterizar las propiedades hidrofísicas del sustrato.
- ✓ Evaluar los rangos de porcentaje de drenaje.
- ✓ Evaluar el crecimiento, la producción y calidad del cultivo.
- ✓ Evaluar el potencial hídrico de la planta y del sustrato.
- ✓ Determinar la eficiencia en el uso del agua (EUA).
- ✓ Analizar la incidencia fitosanitaria.
- ✓ Analizar el comportamiento de la CE, pH y nitratos en el emisor, sustrato y lixiviado.

1. Marco conceptual

1.1 El agua

Es un recurso natural no renovable, vital para los seres vivos, en humanos y animales constituye aproximadamente el 72% de su peso corporal (Contreras *et al.*, 2008), en plantas leñosas como constituyente llega al 50% y en herbáceas entre 80-90%, e interviene en procesos fisiológicos directa o indirectamente como la turgencia celular, el crecimiento, la apertura estomática y la fotosíntesis (Torrecillas, 2011b). Además es el vehículo de transporte de los elementos nutritivos desde medio de cultivo hasta las raíces, y a partir de estas al resto de la planta (Amézquita, 1999).

En el ciclo antrópico del agua tienen dos tipos de usos: el consuntivo y el no consuntivo. El primero hace referencia al evento en que gran parte de la extraída retorna al ciclo natural, mientras que para el uso no consuntivo debe establecerse un sistema de recogida, por lo tanto es importante diferenciar entre el agua que es extraída y el agua que realmente es consumida, el agua que es extraída pero no consumida, toma dos direcciones, puede regresar a los ríos o se infiltra en el suelo y es almacenada en los acuíferos, resaltando que la mayor parte del agua que es extraída para la agricultura es consumida por el riego (60%), esto debido a la evaporación, incorporación a los tejidos de las plantas y transpiración de los cultivos (Guzmán, 2011).

El cambio climático traerá consigo una mayor variación en los fenómenos meteorológicos, con temperaturas extremas más frecuentes, y nuevos retos de adaptación, especialmente los relacionados con el agua y la agricultura. El uso excesivo y la degradación de los recursos hídricos para la producción en regiones críticas, amenazan la sostenibilidad de los medios de subsistencia que dependen del agua y la agricultura, en grandes zonas del sur y el este de Asia, en el Medio Oriente, África del Norte, América del Norte y

Centroamérica la extracción subterránea excede la tasa de recarga natural llevando a un declive progresivo en los acuíferos, tanto en estas regiones donde millones de hogares dependen del agua para la producción, como aquellas en las de agricultura intensiva y desarrollo industrial, se contaminan los cuerpos de agua. Es necesario intervenir mediante la implementación de políticas planificadas y graduales que busquen reducir la extracción y contaminación, para asegurar un consumo racional, al mismo tiempo que se proponen alternativas eficaces a las familias que dependen de actividades relacionadas con la explotación y uso de este recurso, también se requiere de una mayor inversión en medidas que mejoren la infraestructura para el almacenamiento, captura y reutilización de aguas residuales, investigación en sistemas de producción más flexibles para los pequeños productores, y la protección de zonas de alta montaña donde gran parte del suministro mundial tiene origen (FAO. 2015).

Al ser el agua uno de los factores esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, su ausencia representa una de las más importantes causas de estrés (Moreno, 2009).

En plantas de rosa los síntomas de estrés hídrico dependen de la intensidad y frecuencia, sin embargo el exceso de agua en el suelo también llega a ser nocivo, ya que se reduce la aireación y se genera un desarrollo anormal, destacándose amarillamiento, clorosis y caída de las hojas (Folegatti *et al., 2001*).

1.1.1 Déficit hídrico en las plantas

Cuando la planta no logra controlar eficazmente la pérdida de agua, cuando la tensión de humedad se incrementa de manera crítica, se presentan síntomas de deshidratación en la misma, como pérdida de la presión de turgencia en hojas, resultando marchitas y con ablandamiento en los extremos de los tallos. En un tiempo relativamente corto las hojas pierden la capacidad de enfriarse a sí mismas, debido a que el volumen de agua evaporado no es suficiente para cumplir con el requerimiento de refrigeración del tejido, de mantenerse esta condición y bajo la presencia de luz solar, la temperatura de las hojas se incrementará, con la posibilidad de llegar a temperaturas que puedan causar daños en el follaje, sin embargo las plantas están en la capacidad de adaptarse a esta tipo de situaciones (Lieth, 2008).

Es importante conocer los mecanismos de resistencia al estrés, ya que permiten comprender los procesos evolutivos relacionados en la adaptación de las plantas a ambientes hostiles y contribuyen hasta cierto nivel a predecir la respuesta vegetal ante condiciones poco favorables (Vallares *et al.,* 2004). Dentro de los estreses abióticos más representativos a los que se encuentran sometidas las plantas, se destaca el déficit hídrico, ante esta anomalía la planta genera mecanismos de resistencia al estrés, descritos por Leviv (1980); *evasión, evitación* y *tolerancia*. La *evasión* en plantas efímeras consiste en completar el ciclo mientras hay agua en el suelo, pasando el periodo adverso en forma de semilla, otras plantas son de variedades tempranas o estacionales, algunas especies entran en una dormancia vegetativa parcial mientras dura la sequía. En la *evitación* de especies a la deshidratación celular se destacan la epinastia, regulación estomática, la arquitectura de la planta y la aceleración ontogenia (defoliación). La *tolerancia* de especies a la deshidratación celular se encuentra representada por el ajuste osmótico y el ajuste elástico (Torrecillas, 2011c; Vallares *et al.,* 2004).

En condiciones de estrés hídrico, las plantas también responden a través de procesos celulares y moleculares, los productos de los genes inducibles por estrés cumplen su función tanto en la respuesta inicial al estrés como en el asentamiento de la tolerancia al estrés de la planta (Shinozaki y Yamaguchi-Shinozaki, 2007). La modificación de la expresión génica aparece como una de las más importantes respuestas al estrés hídrico, y está relacionada con la producción de enzimas clave en la vía de síntesis de osmolitos, proteínas con función protectora, enzimas antioxidantes, factores de transcripción y otras proteínas relacionadas en las respuestas de las plantas a condiciones de estrés hídrico (Xiong *et al.*, 2002).

En plantas de rosa en maceta, reducciones de agua afectó el uso del agua por parte de la planta y el potencial fotosintético a través de la regulación estomática (Örgen and Öquist, 1985), donde descensos de la fotosíntesis durante las primeras etapas de estrés hídrico se debió a la interacción conjunta de factores estomáticos y no estomáticos, por otra parte disminuciones de la actividad fotosintética bajo escenarios de estrés hídrico severo se atribuyó a factores no estomáticos tales como cambios bioquímicos inducidos por tal condición. Bolla *et al.,* (2010) reportaron que en plantas de rosa “Eurored” (Hybid Tea)

cultivadas en sustrato, y bajo condiciones de estrés hídrico (67% de las necesidades de riego), se causó un efecto nocivo sobre la tasa de fotosíntesis y la conductancia estomática, pero sin disminución del CO2 intercelular, descenso de la clorofila en las hojas y la fluorescencia de la clorofila, disminución en la tasa de transpiración, potencial hídrico foliar y contenido relativo de agua, pero con aumento en la eficiencia del uso del agua, y reducción en la producción total de tallos florales.

1.2 Características generales del cultivo

1.2.1 Rosa

La rosa se considera originaria de la China, expandiéndose a la India, Persia, Grecia, Italia y España. Las primera rosas cultivadas eran de floración estival, sin embargo en los siguientes trabajos de selección y mejora efectuados en oriente sobre algunas especies, principalmente *Rosa gigantea* y *R. chinensis* dieron como resultado la 'rosa de te' de carácter floreciente, e introducida en occidente en 1973, sirviendo como base para un gran número de híbridos creados (Franciso, 2010).

La rosa es una planta exótica de gran interés ornamental perteneciente a la familia de las Rosáceas (Álvarez, 1980). Actualmente es una de las especies más conocida, cultivada y solicitada como flor de corte, dadas sus características de insuperable belleza, amplia variedad de colores, tonos y combinaciones que presenta, su suave fragancia y diversidad de formas, entre otras; en conjunto, esto hace que la rosa tenga un lugar de preferencia en la decoración y el gusto del público consumidor (Yong, 2004).

Para flor de corte los de mayor empleo son los tipos 'híbridos de té' y en menor medida los de 'floribunda' (Soria, 2013). Los 'híbridos de té' son plantas que producen tallos conformados por una sola flor, de gran diversidad de colores, y generalmente desarrollan tallos de 0.50 a 1 m de longitud, con rendimientos de 100 a 150 tallos m^{-2} $año^{-1}$ (García, 2015). Dentro de los 'híbridos de té' se encuentra la variedad *Vendela*: una rosa crema que crece en Holanda, Colombia y Ecuador, que cuando está en su máximo de floración llega a tener un diámetro de tallo de 6 cm, alcanzando longitudes entre 40 y 100 cm, tamaño de

botón de 5 a 6.5 cm, entre 35 y 40 pétalos, con vida florero de 16 a 18 días, y producción de 1.4 tallos planta^{-1} mes^{-1} aproximadamente (Soria, 2013).

1.2.2 Fenología de la rosa

El ciclo de un tallo floral en promedio toma entre 10 a 11 semanas, considerándose que la mitad de este periodo es de crecimiento vegetativo y la otra mitad, reproductivo. El periodo vegetativo se subdivide en inducción del brote y desarrollo del tallo floral, las hojas falsas se encuentran cerradas y presentan un color rojizo en la mayoría de ocasiones. El periodo reproductivo comienza con la inducción del primordio floral, (palmiche) coincidiendo con una diferenciación del color del tallo y las hojas de rojo a verde, seguido de los estadios fenológicos llamados ‘arroz’ (diámetro de botón alrededor de 0.4 cm), ‘arveja’ (0.5 a 0.7 cm), con hojas completamente abiertas y el botón se observa más redondeado, ‘garbanzo’ (0.8 a 1.2 cm), pierde el color rojizo en tallos y hojas, ‘rayar color’ (1.8 a 2.9 cm) señala el momento en que los sépalos han comenzado a separarse debido al crecimiento del botón permitiendo ver el color de los pétalos, y ‘corte’ (cosecha) indica el momento en que la flor se encuentra a un punto específico de apertura comercial, más no fisiológica (Cáceres *et al.,* 2003).

1.2.3 Características taxonómicas de la *Rosa sp*

De acuerdo con la taxonomía generalmente aceptada existen 120 especies pertenecientes al género Rosa, originarias de ciertas zonas templadas del hemisferio del hemisferio norte y las zonas subtropicales del mundo (Arévalo, 2011).

Tabla 1-1 Clasificación taxonómica del cultivo de rosa (*Rosa sp*).

Reino	Vegetal
División	Espermatofitos
Subdivisión	Angioespermas
Clase	Dicotiledoneás
Orden	Rosales
Familia	Rosáceas
Tribu	Roseas
Género	Rosa
Especie	Sp.

Fuente: (Yong, 2004)

La familia de las rosáceas está compuesta por plantas muy variadas en su aspecto, pues contiene desde plantas que no tienen más de 15cm de altura, pasando por todos los tamaños y formas posibles de arbustos, hasta trepadoras que alcanzan los 12 m. Cultivados principalmente por belleza de sus flores, desde la rosa silvestre hasta los capullos con muchos pétalos que caracterizan a algunas de las rosas más antiguas (Yong, 2004).

La rosa moderna es una planta perenne que genera tallos florales continuamente, con variaciones en cantidad y calidad, manifestando diversos estadios de desarrollo, desde una yema axilar en estadió de brotación hasta un tallo listo para cosechar (Chaparro *et al.,* 2006), pueden ser propagadas por semilla, esqueje o injerto, siendo el injerto de vareta en injertos de yemas el método más empleado a nivel comercial (García, 2015).

1.2.4 Requerimientos edafoclimáticos

La luz interviene en el proceso más importante para las plantas, la fotosíntesis, además bajo condiciones de alta irradiación se estimula la producción. En rosas el efecto de una elevada intensidad lumínica sobre el rendimiento, indica que a mayores niveles de iluminación, tanto de radiación natural como iluminación suplementaria, se incrementa el rendimiento y la calidad de la flor. La temperatura es otro factor ambiental que tiene un efecto considerable sobre la calidad y la producción de la rosa. Las temperaturas óptimas de crecimiento, que dependen de la iluminación existente se consideran entre 15 y 24°C,

21 a 24°C durante el día, y 15 a 16°C durante la noche (Yong, 2004). Con temperaturas elevadas se tiene un mayor número de tallos, no obstante también, de flores más cortas y menos pesadas (Rodríguez y Flórez, 2006). Las temperaturas frías, de la noche por debajo de los 15°C también afectan considerablemente el crecimiento, retrasándolo, las flores desarrollan un gran número de pétalos que se deforman y aplanan produciendo flores llamadas “cabezas de toro”. Se han mencionado incrementos de producción, mejoras de calidad aumentos de superficie foliar, etc., al mantener altas humedades relativas (70 a 80%), sin embargo el exceso de humedad puede conducir a enfermedades del follaje, tales como mildiu velloso y la mancha negra, algunos autores plantean que al descender la humedad relativa por debajo de 60% se pueden generar desordenes fisiológicos en ciertos cultivares, como la deformación de los botones y hojas menos desarrolladas. Las concentraciones de CO2 desempeñan una función importante en la producción de fotoasimilados, derivados del proceso de la fotosíntesis, el rosal aumenta su productividad y calidad con niveles de 1200 ppm, la concentración normal de CO2 en el aire esta alrededor de 335 ppm; varios autores han demostrado que incrementos en la concentración de CO2 en la atmósfera del invernadero, genera efectos muy positivos, fundamentalmente aumentos en el número de flores y peso seco, entre 20 y 30%. El sustrato como sustituto del suelo, provee el ambiente propicio para el desarrollo de raíces, ya que sus características contribuyen a que estas puedan emplear toda su capacidad de crecimiento, expandirse y multiplicarse, antes que vencer la resistencia que ejercen medios más densos como el suelo (Yong, 2004).

1.2.5 Plagas y enfermedades

Las principales plagas y enfermedades del cultivo de la Rosa sp, se presentan en las Tablas 1-2 y 1-3.

Tabla 1-2 Principales plagas de rosa.

Nombre común	Nombre científico	Daño producido
Ácaros (araña roja)	*Tetranychus spp*	Punteado o manchas finas blanco-amarillentas en los foliolos
Afidios (pulgones)	*Aphis spp*	Ataca lo vástagos jóvenes o a las yemas florales
Trips	*Frankliniella occidentalis*	Deformación en las flores, que además muestran listas generalmente de color blanco debido a daños en el tejido
Mosca Blanca	*Trialeviodes*	Daño en el envés de la hoja

Fuente: (Francisco, 2010)

Tabla 1-3 Principales enfermedades de rosa.

Nombre común	Nombre científico	Daño producido
Moho gris	*Botrytis cinérea*	Daño en flor y tallo
Mildiu Polvoso	*Sphaerotheca pannosa*	Esporulación abundante en foliolos y botón
Mildiu Velloso	*Poronospora sparsa*	Daños en foliolos y deformación de hojas, rápida defoliación
Mosca Blanca	*Puccinia horiana*	Pústulas de color naranja en el envés de las hojas

Fuente: (Francisco, 2010)

1.2.6 Efectos de la salinidad en el sustrato y agua de riego

La concentración de sales totales disuelta en el agua (salinidad) afecta el crecimiento y la calidad de las plantas, puesto que trae consigo toxicidades específicas de iones, o puede ocasionar desequilibrios nutricionales, dependiendo de la concentración y el tipo de sales, así como de la susceptibilidad que tengan los cultivos (Vélez *et al.,* 2014). Sumado a esto la salinidad original del sustrato o su capacidad en mayor o menor medida para acumular sales también puede ser un limitante para el desarrollo normal del cultivo. Se considera

que valores de conductividad eléctrica (CE), tomadas en el extracto de saturación por encima de 3.5 dS m^{-1} (a 25°C) es extremo para la mayoría de las especies cultivadas. La acumulación de sales de un sustrato se encuentra estrechamente relacionada con su capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el manejo dado al fertirriego (Martínez y Roca, 2011). Oki y Lieth (2004), concluyeron que el aumento de la salinidad del sustrato puede influir en la tasa de elongación del tallo en *Rosa hybrida* L. 'Kardinal'.

Cuando un medio de cultivo presenta mayor porcentaje de finos, se dificultará el lavado de sales en los casos en que sea requerido. Esto es importante en sistemas de recirculación de la solución nutritiva, que debido al incremento progresivo de la concentración de nutrientes, genera un aumento del potencial osmótico en la zona radicular, lo que limita la absorción de agua por la planta (Martínez y Roca, 2011). En los cultivos sin suelo bajo el sistema de recirculación, cuando la CE es menor de 0.6 dS m^{-1} la recirculación total no suele presentar ningún tipo de problema, se convierte en limitante cuando la CE es superior a 1dS m^{-1} (Vélez *et al.,* 2014). Sin embargo Nirit *et al.,* (2006) reportaron que en rosa cv 'Mercedes' la productividad y la calidad no se vieron afectadas por el uso de agua residual tratada, con niveles de Cl que alcanzaron 2.5 dS m^{-1} de CE.

1.2.7 Crecimiento y desarrollo

El crecimiento y desarrollo de las plantas son dos conceptos que se deben diferenciar. De acuerdo con Flórez *et al.,* (2006) el desarrollo es aquel conjunto de eventos que contribuyen a la progresiva conformación del cuerpo de la planta y que la facultan para conseguir alimento, reproducirse y adaptarse plenamente a su ambiente. Comprende los procesos elementales de crecimiento y diferenciación. El desarrollo también es considerado sinónimo de morfogénesis.

El crecimiento es catalogado como el incremento de tamaño de un organismo, el cual no solo aumenta en volumen, sino también en masa, número de células y cantidad de protoplasma, también denota los cambios cuantitativos que tienen lugar durante el desarrollo. Los aumentos en volumen en algunas ocasiones se calculan de manera aproximada midiendo la expansión únicamente en una o dos direcciones, tal como la

longitud, el diámetro del tronco o el área de una hoja. Algunas estructuras vegetales tienen crecimiento determinado, en otras es indeterminado. Las hojas, las flores y los frutos son buenos ejemplos de estructuras determinadas, ya que crecen hasta cierto tamaño y se detiene, mientras que el tallo y la raíz son estructuras indeterminadas, creciendo por meristemos que frecuentemente se renuevan (Flórez *et al.,* 2006).

El análisis de crecimiento se fundamenta en la evolución de medidas como peso seco, longitud de tallos, número de hojas, número de ramas entre otros (Arévalo, 2011). Por otra parte puede ser descrito desde el punto de vista matemático, a través de medidas directas tales como la masa seca total de la planta, área foliar y tiempo, y medidas derivadas como son la tasa de crecimiento relativo (TCR), la tasa de crecimiento del cultivo (TCC), la tasa de asimilación neta (TAN), duración del área foliar (DAF), relación del área foliar (RAF), índice del área foliar (IAF), y área foliar específica (AFE) (Melgarejo *et al.,* 2010).

Los modelos de crecimiento han sido desarrollados con el fin de describir tendencias o comportamientos a través del tiempo, destacándose los modelos empíricos lineales y no lineales que representan y detallan en alguna medida el tamaño de un órgano a través del tiempo (t), considerando que además de las variaciones aleatorias, el crecimiento sigue una curva tipo sigmoidal, que caracterizan la tendencia del crecimiento y tienen una mejor interpretación de los parámetros que los modelos de regresión polinomial (Flórez *et al.,* 2006).

1.3 Continuo sustrato - planta – atmósfera

El agua es transportada a través del medio de cultivo a las raíces, y del xilema hacia el dosel, donde paulatinamente es transpirada a la atmósfera. Lo ideal es tener una captación continua de agua tanto para el crecimiento como la supervivencia, debido a las grandes pérdidas de agua que ocurren durante el día, y sobre todo en periodos donde la tasa evaporativa es alta, cuando la pérdida de agua no es sustituida de forma inmediata, las tensiones vinculadas con la deshidratación pueden llegar a afectar el rendimiento, por lo tanto, la disponibilidad de agua para las raíces de las plantas en medios de cultivo sin suelo requiere de especial atención, particularmente por el volumen radicular limitado y la densidad de las raíces. El equilibrio momentáneo entre el flujo actual de agua alrededor

del volumen medio de las raíces y la tasa potencial de extracción de agua, que depende principalmente de las condiciones atmosféricas, permite establecer si la humedad con la que cuenta el medio, está totalmente disponible para la planta, refiriéndose a que el agua extraída de la zona radicular es restituida en su totalidad, a una velocidad tal que coincida con la transpiración potencial (Wallach, 2008).

El potencial hídrico es definido como la diferencia de energía libre que tiene el agua en un sistema suelo- planta –atmósfera, en comparación con la energía libre del agua pura y libre bajo condiciones estándar de presión y temperatura. Los factores que determinan gradientes de potencial hídrico en la planta son: la temperatura, la presión los solutos, y las matrices (Torrecillas, 2011d). El agua fluye a través del gradiente de potencial en un medio de cultivo, donde altos potenciales (menos negativo) totales de agua se dan a través del sistema vascular de la planta a las hojas, y continúa hacia la atmósfera, en la cual el potencial es inferior (más negativo). La velocidad de flujo es proporcional al gradiente de potencial e inversamente proporcional a la oposición que es ejercida por la interface suelo - planta – atmósfera (Raviv y Blom, 2001). El agua en un medio de cultivo está sometida a una serie de fuerzas, las cuales son el resultado de la atracción mutua entre la matriz sólida y el agua, de la presencia de solutos del medio, así como de la acción de la presión externa y la gravedad. De acuerdo con ello el potencial total del agua en un medio de crecimiento es la suma de los aportes independientes de esos factores (Ecuación 1-1) (Wallach, 2008).

$$\Psi_t = \Psi_g + \Psi_m + \Psi_o \qquad \text{Ecuación } 1-1$$

Donde Ψ_t es el potencial total, Ψ_g es el potencial gravitacional, Ψ_m es el potencial matricial, y Ψ_o es el potencial osmótico.

Conocerla humedad del suelo contribuye a la toma de decisiones en la programación del riego, determinar la cantidad y frecuencia de agua a aplicar, evitar pérdidas por percolación o por escurrimientos, y reducir el consumo de energía (Enciso *et al.,* 2007).

1.3.1 El sistema sustrato-agua

El contenido de humedad en un medio (suelo o sustrato) no saturado se relaciona con la succión (h), en medios no saturados la presión a la que esta retenida el agua adquiere un valor negativo, lo que significa presiones por debajo de la atmosférica o de succión (Quintero, 2009). Usualmente esta fuerza es medida en centibares, en el caso específico de sustratos se mide en cm de agua (Calderón y Cevallos, 2001). La curva característica del agua de medios porosos, o curva de retención de humedad (CRH), describe la relación funcional entre el contenido de agua (θ) y el potencial matricial (Ψ_m) en condiciones de equilibrio, y está relacionada con la distribución del espacio poroso (tamaños e interconexión). La CRH indica la cantidad de agua presente en el medio poroso a un potencial matricial dado, y se utiliza con frecuencia en sustratos para estimar la disponibilidad de agua para las plantas y para la gestión del riego. Para fines de modelado y análisis, y para la caracterización y comparación de diferentes sustratos y escenarios, es fundamental representar la CRH en continuo y de forma paramétrica, comúnmente se expresan como funciones conocidas que contienen cierto número de parámetros (Wallach, 2008). Un modelo paramétrico eficaz y de uso frecuente que relaciona el contenido de agua a determinado potencial matricial fue propuesto por Van Genuchten (1980) y es definido por la Ecuación 1-2.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\left[\frac{1}{1+(\alpha h)^n}\right]^m \qquad \text{Ecuación 1-2}$$

Donde S_e es la saturación efectiva, α, n y m y son parámetros empíricos que determinan la forma de la CRH, h es la presión del agua en el suelo, θ, θs y θr es el contenido de humedad del suelo, del suelo saturado y residual, respectivamente.

Para el análisis de la retención de agua y conductividad hidráulica de suelos no saturados Van Genuchten *et al*., (1991), implementaron el software RETC. Estas propiedades hidráulicas son parámetros clave en cualquier descripción cuantitativa del flujo de agua hacia y a través de la zona no saturada de los suelos. El programa emplea los modelos paramétricos de Brooks-Corey y de Van Genuchten para representar la CRH del suelo, y los modelos de distribución de tamaño de poro teóricos de Mualem y Burdine para predecir

la función de la conductividad hidráulica no saturada a partir de datos de retención de agua del suelo.

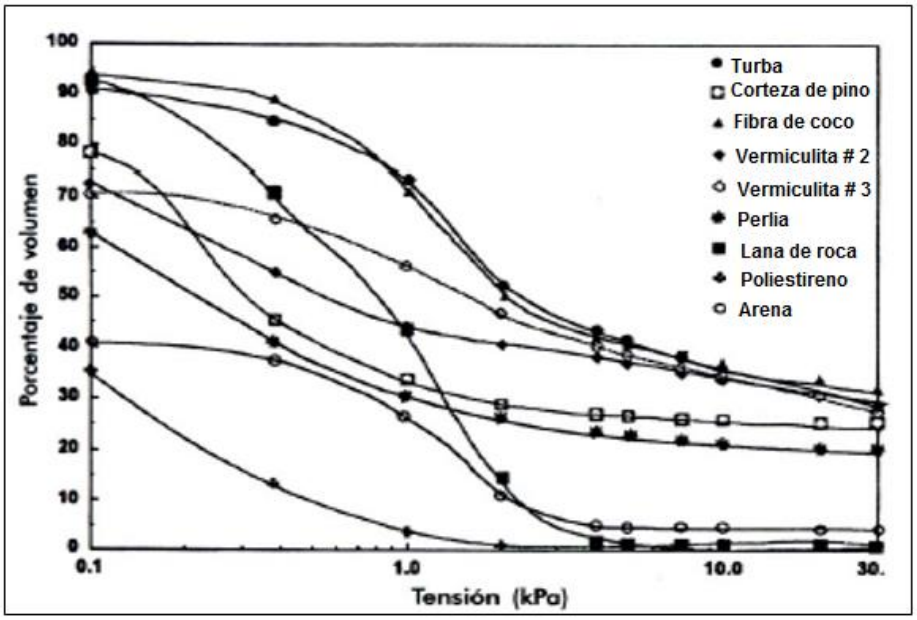

Figura 1-1 Curvas de retención de humedad para sustratos usados comercialmente (Fonteno, 1999).

Para caracterizar técnicamente la cantidad de humedad retenida y la fuerza con la que esta retenida en el sustrato, Verdonck y Cappaert propusieron el empleo de la curva de liberación de agua del sustrato (Ansorena; 1994, Burés, 1997), dentro del rango de 0 a 100 centímetros de columna de agua (cm c.a) de tensión, con unos intervalos que definen en termino prácticos el potencial mátrico del sustrato, correspondiente a la fuerza de succión o retención del agua que ejerce el mismo, caracterizando la disponibilidad de agua para la planta (Martínez, 2011).

Agua Difícilmente Disponible (ADD): Se refiere al contenido de humedad en porcentaje volumétrico retenido a succiones superiores a 100 cm c.a, indicando que al aumentar la fuerza de succión que debe ejercer la planta mayor será el gasto energético, disminuyendo la energía disponible para la producción de materia seca.

Agua de reserva (AR): Es definido como el porcentaje en volumen que es liberado cuando la tensión del sustrato se encuentra entre 50 y 100 cm c.a.

Agua fácilmente Disponible (AFD): Es el porcentaje volumétrico de agua que libera el sustrato a tensiones de succión de 10 a 50 cm de columna de agua (-1 a -5 kPa), considerándose que bajo estas condiciones hídricas la planta tiene un crecimiento óptimo, con rango recomendable de AFD entre 20 y 30% en volumen.

Agua Total Disponible (ATD): Definido como la suma entre el AFD y AR, o la diferencia entre el contenido volumétrico a 10 y a 100 cm c.a.

Capacidad de Aire (CA): Es el porcentaje en volumen de agua que llega a liberarse al ejercer una tensión de 10 cm c.a sobre el sustrato, o tanto por ciento de aire que permanece en el sustrato a la misma tensión.

La conductividad hidráulica (k_h) considerada una de las propiedades de suelos o sustratos más complejas, puesto que se relaciona directamente con su contenido de humedad, caracteriza el movimiento que puede tomar un fluido en cada una de las direcciones en un medio poroso, se puede expresar en términos de presión (h), contenido de humedad volumétrico (θ) o saturación efectiva (Se) (Quintero, 2011).

1.3.2 Sustrato

Es definido como aquel material sólido diferente del suelo, puede ser natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, que al ser colocado en un contenedor, individual o mezclado, cumple dos funciones básicas: como anclaje del sistema radicular de la planta, aferrándolas, protegiéndolas de la luz y facilitando la respiración; y como contenedor del agua y nutrientes que la planta requiera (Ansorena, 1994; Calderón y Cevallos, 2001).

La producción de plantas en contenedor representa una práctica agrícola muy intensiva, con grandes cantidades de agua y aplicación de fertilizantes, las características hidro-físicas tales como la infiltración de agua, la estructura y textura, la distribución de tamaño de partículas afecta la calidad de los medios utilizados en los sistemas agrícolas en contenedores, además de la disponibilidad de agua para las plantas (Vivek Kumara *et al.,* 2010).

La distribución de tamaño de partículas (DTP) define la textura de un medio poroso, la retención de agua, y representa la propiedad física más importante, relacionando la distribución de poros y la porosidad total (PT) (Wallach, 2008). Sin embargo conocer el porcentaje de PT, determinado a partir del cálculo de la densidad real y aparente, no es suficiente para afirmar que un sustrato posee un adecuado equilibrio entre los contenidos de agua y aire, también es necesario conocer el tipo de poros y su proporción volumétrica, distinguiéndose dos tipos de poros abiertos, y clasificados según su tamaño como capilares o microporos, con diámetro inferior a 30 μm, que almacenan agua, y macroporos, mayores a 30 μm, que se llenan de aire posterior al drenaje (Martínez y Roca, 2011). Materiales con partículas más gruesas contribuyen a una percolación de agua más rápida, lo que puede resultar en un flujo de aire a través de estos materiales y posible secado (Vivek Kumara *et al.,* 2010). Un sustrato al tener una porosidad total elevada, densidad aparente baja, y una excelente durabilidad facilita la capacidad de almacenamiento de agua y nutrientes, y la fácil penetración de las raíces (Chamindu *et al.,* 2013). Para mantener la rizosfera en buenas condiciones es necesario tener un control óptimo del agua y aire, especialmente en volúmenes restringidos como contenedores en invernadero (Chamindu *et al.,* 2013).

Como parte fundamental para obtener un reparto homogéneo del agua y los nutrientes en todo el volumen del sustrato, comúnmente se practica el riego en exceso, garantizando por un lado que la solución llegue a todo el sustrato, y por otro, desplazar residuos de solución nutritiva anterior (Martínez y Roca, 2011). Si la fuente de agua contiene sales, va a aumentar el nivel de salinidad en el agua de riego, situación problemática para las plantas, de darse esto es necesario que el volumen de lixiviado sea relativamente elevado (Lieth y Oki, 2008).

Mientras que en Europa los sustratos más empleados son lana de roca, fibra de coco, derivados de arcilla o mezclas con turba, en Colombia, Brasil y otros países de América Latina el sustrato de mayor uso es la cascarilla de arroz parcialmente quemada, siendo un subproducto de la industria arrocera. En Colombia principalmente se utiliza en cultivos de flores debido a su bajo costo y alta disponibilidad (Quintero *et al.,* 2013). De acuerdo con Quintero y González (2004), los sustratos de mayor uso en los cultivos de flores en la Sabana de Bogotá son: cascarilla de arroz quemada (CAQ), escoria de alto horno,

cascarilla de arroz cruda (CAC) y turba, también mezclas de cascarilla de arroz quemada con escoria de carbón, fibra de coco, y en menor proporción compost y cascarilla de arroz esterilizada (reutilizada) (Quintero y González, 2004).

La cascarilla de arroz (CA) utilizada como sustrato se caracteriza por una baja tasa de descomposición gracias a su alto contenido de sílice (12-16%); baja densidad aparente (0.09 a 0.22 g m^{-3} de masa seca); buen drenaje y aireación, permeabilidad y conductividad hidraúlica elevada; pH neutro, CE y CIC bajas; rico en potasio y fósforo, pobre en nitrógeno, debido a los elevados contenidos iniciales de potasio, pero bajos de calcio y magnesio, por lo que se crea la necesidad de aplicar enmiendas en los estadios iniciales de clavel y rosa (Quintero , 2011). Para mejorar la retención de humedad de la CA se ha recurrido a la quema parcial de la misma, mejorando considerablemente la humectabilidad, pero aumentando poco la capilaridad ascensional y la retención de humedad (Calderón, 2002). En cultivos de rosa, donde el suelo se ha convertido en una limitante, en cuanto al establecimiento y manejo del mismo, por enfermedades o propiedades fisicoquímicas poco idóneas para su normal desarrollo, se ha venido implementando los sistemas sin suelo (Petitt, 2011). Ante el creciente cambio de medio de cultivo en el sector floricultor, es necesario conocer las demandas hídricas de la rosa sembrada en contenedores y en invernadero (Esmeral, 2011).

1.3.3 Condición hídrica del sustrato

Determinar el contenido de agua de un medio de cultivo, implica conocer su estado hídrico y progreso temporal, monitoreando su respuesta a condiciones de lluvia y riego (Díaz, 2015). El contenido de agua habitualmente es expresado de las siguientes maneras: en base a peso, al contenido volumétrico o el equivalente en profundidad de lámina de agua, y en porcentaje o grado de saturación, sin embargo el más común y de mayor utilidad es el contenido volumétrico. Existen diversos métodos de medición del contenido de agua, y se clasifican como directos o indirectos, los primeros son más invasores, puesto que implica de cierta forma eliminar o separar el agua de la matriz del medio (suelo o sustrato) y medir directamente la cantidad de agua removida. Los métodos indirectos se basan en la medición de alguna propiedad química o física del medio de cultivo que tiene relación con su contenido de agua, tales como la constante dieléctrica, la conductividad eléctrica,

la capacidad calorífica y la afinidad magnética. En sustratos el método que ha tenido un amplio uso es el TDR, basado en la medición de señales electromagnéticas reflejadas que viajan en cables de transmisión y guías de onda incorporadas en el medio de cultivo, con el fin de medir la constante dieléctrica aparente del medio. La calibración del TDR fija la relación entre la constante dieléctrica aparente del medio de cultivo y la humedad volumétrica (Wallach, 2008).

1.3.4 Fertirriego

En los cultivos de flores, para alcanzar calidades optimas, los tejidos de los tallos florales deben mantenerse hidratados y dentro de los rangos nutricionales prestablecidos, por esto, el manejo del fertirriego, aplicación de fertilizantes junto con el riego, aparece como una práctica común (Barrientos *et al.,* 2011), y una solución parcial a la limitada disponibilidad de agua y nutrientes (Raviv *et al.,* 2008). Sin embargo los riesgos de esta práctica asociados a los lixiviados en cultivos de flores en sistemas abiertos o de libre drenaje (Figura 1-2), llegan a tener consecuencias negativas en el entorno donde tiene lugar la actividad agrícola, sumado a esto, al momento de manejar la nutrición para el cultivo en sustrato, debe tenerse en cuenta las interacciones entre los iones y la acumulación de sales en este medio, puesto que se verá afectada la disponibilidad de los nutrientes para la planta, en consecuencia para formular la solución de fertirriego es clave tener en cuenta las condiciones ambientales, la calidad del agua, las características físico-químicas del medio de cultivo, el riego y la frecuencia (Petitt, 2011). En un cultivo sin suelo tipo orgánico, el factor relevante que afecta el ajuste de la composición nutricional en la solución suministrada es la capacidad de libración iónica y la adsorción del sustrato (Ao *et al.*, 2008).

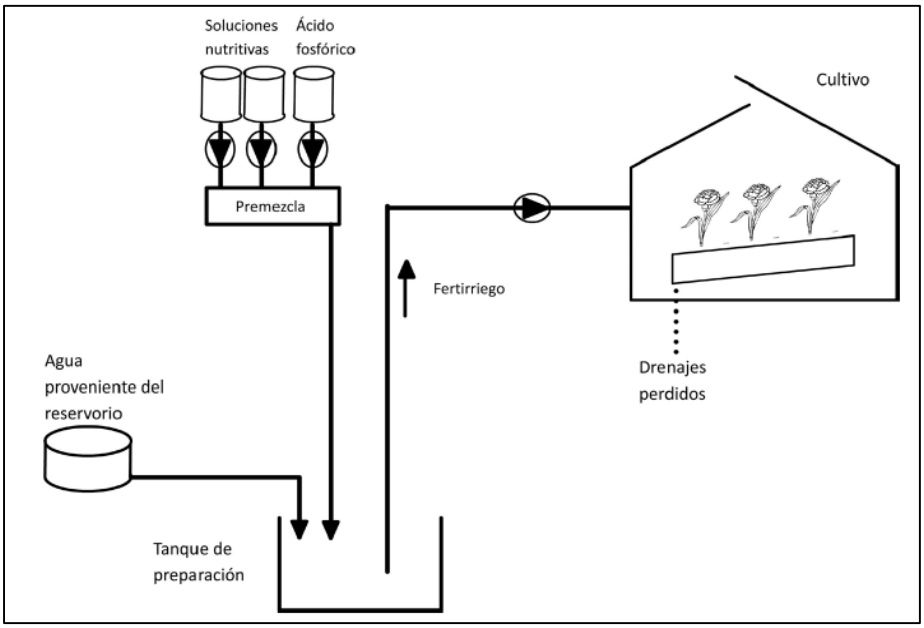

Figura 1-2 Esquema básico para un sistema de tipo abierto en cultivos sin suelo (Cuervo *et al.,* 2011).

1.4 Requerimientos hídricos de los cultivos

Los requerimientos hídricos de un cultivo hacen referencia a la cantidad de agua y al instante en que se aplica, buscando compensar el déficit de humedad del suelo o sustrato, y la demanda evaporativa que tiene lugar durante el periodo vegetativo (Arévalo, 2011). En la mayoría de cultivos las necesidades varían conforme al estado de desarrollo de los mismos, en función del crecimiento radicular, expansión del área foliar y aparición de estructuras diferenciales (Arenas, 2011).

En la producción de flores, la esencialidad del agua en la búsqueda de altos rendimientos es una realidad, produciendo la hidratación e hinchamiento de las células, ambos fenómenos causan el crecimiento vegetal, lo que conlleva en la floricultura a una necesidad de aplicar riegos frecuentes y eficientes (Amézquita, 1999). Sin embargo en cultivos tradicionales de flores las necesidades hídricas no son determinadas, atribuyéndose en gran medida a la cultura generalizada de las prácticas de riego existentes y a la escasa investigación sobre el comportamiento del cultivo y su interacción con los factores ambientales que hacen aumentar o disminuir el consumo de agua dependiendo del estado fenológico (Esmeral, 2011).

1.4.1 Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) es definida como la combinación de dos procesos que se dan por separado, en los cuales el agua se pierde a través de una superficie evaporante (cuerpos de agua y suelo) por evaporación y mediante la transpiración del cultivo, al presentarse simultáneamente no es posible de una manera sencilla distinguir entre estos dos procesos, usualmente se expresa en milímetros (mm) por unidad de tiempo, indicando la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua, lo que significa que una pérdida de 1 mm equivale a una pérdida de 10 m^3 de agua por hectárea. En el cultivo, durante las primeras etapas, el agua que pierde es debida principalmente a la evaporación directa del suelo, sin embargo a medida que se incrementa el desarrollo y cuando este logra cubrir en su totalidad el suelo, el proceso que cobra mayor importancia es la transpiración (Figura 1-3) (Allen *et al.,* 2006).

La tasa de transpiración depende de la planta y de las variables atmosféricas, tales como la radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento y la temperatura del aire (Folegatti *et al.,* 2001).Es un factor clave en la fotosíntesis, además de desempeñar un papel importante en el mantenimiento de la temperatura de la planta (Raviv y Blom, 2001).

Son varios factores los que intervienen en el proceso de evapotranspiración, las características del cultivo y el manejo, el suelo o medio de desarrollo, y las variables atmosféricas que afectan la evaporación y la transpiración (Allen *et al.,* 2006; Folegatti *et al.,* 2001).

El concepto de evapotranspiración encierra tres diferentes definiciones: evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo), evapotranspiración del cultivo (ETc), y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ETcaj). Donde la ETo es un parámetro que está vinculado con el clima que refleja la capacidad evaporante de la atmosfera, por esto puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. La ETc hace referencia a la evapotranspiración de cualquier cultivo que se da bajo condiciones idóneas presentes en parcelas que tienen un manejo óptimo, y adecuado aporte de agua, logrando máximos rendimientos conforme a las condiciones climáticas, generalmente requiere de un factor de corrección (kc), el cual está en función del tipo de cultivo, variedad, edad y

manejo agronómico. La ETcaj se expresa en cultivos que crecen bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes a uno que se desarrolla en condiciones estándar (Allen *et al.,* 2006).

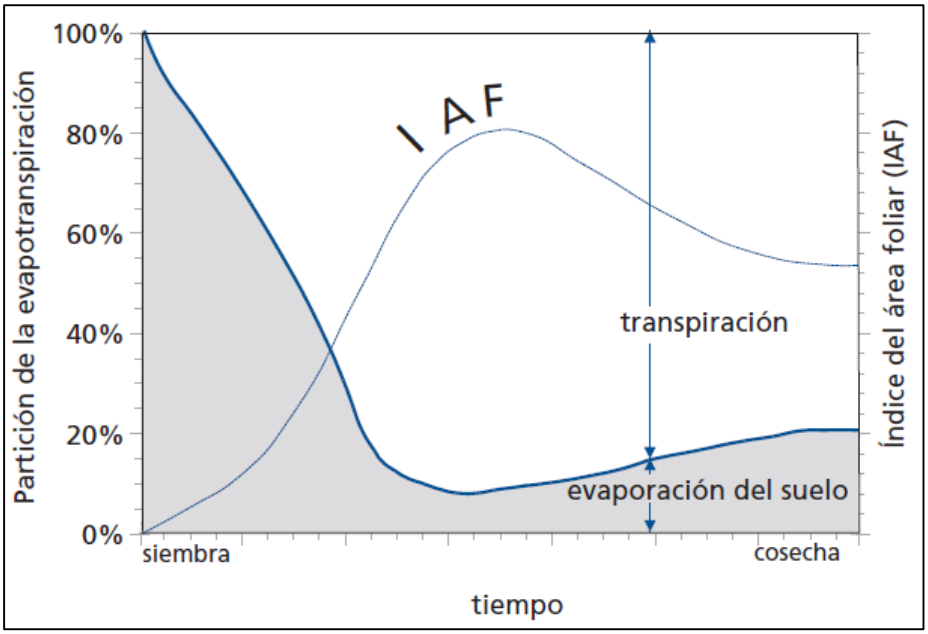

Figura 1-3 Evapotranspiración (evaporación y transpiración) durante el tiempo de crecimiento de un cultivo. Tomado de (Allen *et al.,* 2006).

Dada la complejidad de la evapotranspiración son variables y abundantes los métodos o modelos que han sido elaborados y siguen generándose para su determinación. Estos pueden dividirse en aquellos que emplean información recolectada en la superficie y los que utilizan información captada desde el espacio por percepción remota. Los primeros se subdividen en directos, teóricos y empíricos, en los directos se calcula la ET mediante el control de entradas y salidas de agua en el suelo, mientras que en los teóricos se tiene el fundamento que la evapotranspiración forma parte del balance de energía y juega un rol en la transferencia de masa de vapor de agua entre la tierra y la atmósfera, finalmente los empíricos, que generalmente se categorizan como simplificaciones de los métodos anteriores que, mediante correlaciones obtenidas y medidas de una o más variables climáticas o meteorológicas, ha posibilitado el derivar fórmulas empíricas con el fin de estimar la capacidad evaporativa de un ambiente en particular (Sánchez y Carvacho, 2006).

1.4.2 Coeficiente del cultivo (kc)

Es el cociente entre la evapotranspiración del cultivo (ETc) y evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo). El kc es un factor que representa las diferencias físicas y fisiológicas entre los cultivos y el cultivo de referencia (alfalfa), el cual presenta una apariencia uniforme, abarcando la totalidad de la superficie del suelo (Allen *et al.,* 2006).

Puesto que existen variaciones en las características propias del cultivo durante las etapas de crecimiento, el kc no permanece constante, fluctúa desde la siembra hasta la cosecha (Aguilar-Rivera et al., 2015). Debido a esto las fases de crecimiento de un cultivo están definidas a través de la curva de kc (Figura 1-4), donde se describen cuatro fases: inicial, desarrollo, mediados de temporada y final de temporada. La fase inicial comprende desde la siembra hasta que el cultivo alcanza un 10% de la cobertura del suelo. La fase de desarrollo abarca desde la culminación de la etapa anterior hasta alcanzar la cobertura efectiva completa, en muchos cultivos la cobertura completa ocurre al inicio de la floración. La fase intermedia empieza en la floración y finaliza cuando el cultivo entra en la madurez, esta fase representa la etapa más larga para los cultivos permanentes y para diversos cultivos anuales, y relativamente corta para cultivos hortícolas. La fase final está comprendida por el periodo donde inicia la madurez hasta la cosecha o completa senescencia (Allen *et al.,* 2006).

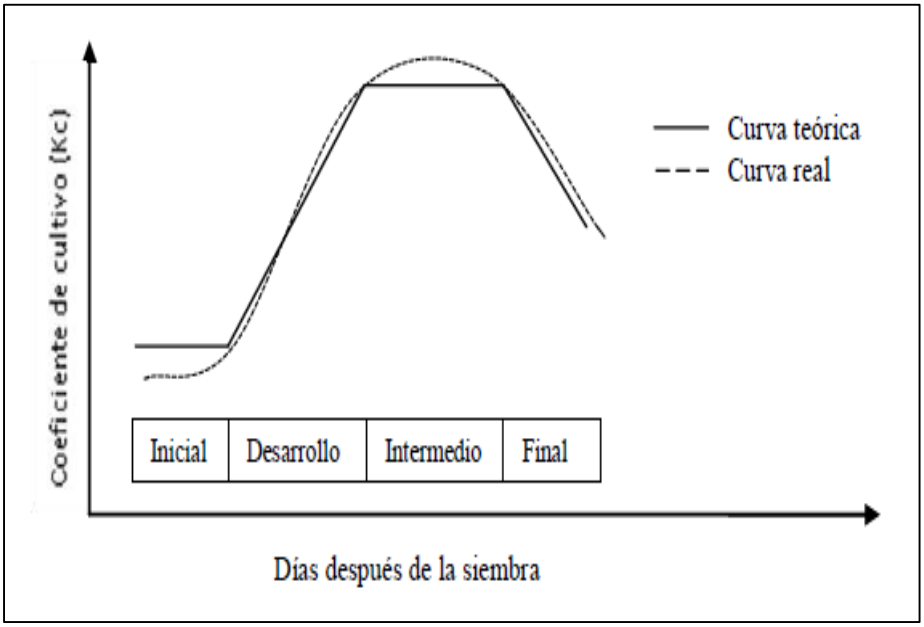

Figura 1-4 Intervalos usuales esperados del factor kc para las cuatro etapas de crecimiento. Tomado de (Esmeral, 2011).

Existen diferentes factores que afectan el kc; el tipo de cultivo (el albedo o reflectancia que afecta la radiación directa, las propiedades aerodinámicas, la altura, características de los estomas y las hojas), el clima (variaciones en la velocidad del viento inciden en el valor de resistencia aerodinámica de los cultivos y en el kc, asi como condiciones de aridez y humedad climática), y la evaporación del suelo (Allen *et al.,* 2006).

1.4.3 Condición hídrica de la planta

La turgencia en las plantas se mantiene cuando la absorción se equipara con la pérdida de agua debido a la transpiración, o cuando no es excedido el rango de su capacidad de ajuste osmótico, en caso que la pérdida de agua por transpiración sea mayor que la absorción, se generará estrés hídrico en la planta, manifestado en una disminución del potencial hídrico de las hojas (Raviv y Blom, 2001).

Las actividades fisiológicas y metabólicas, así como la expansión y el crecimiento de las plantas, son afectadas por el estado hídrico de las células vegetales. Cuando se tienen mediciones exactas del estado hídrico de las plantas esto ayuda a un mejor entendimiento de la productividad bajo condiciones ambientales variables. Diferentes metodologías de gran utilidad son empleadas para medir el estado hídrico de la planta y permiten comprender como las plantas responden a condiciones de estrés por falta de agua (Bennett, 1990). El indicador más apropiado para la programación del riego es la medición del estado hídrico de la planta, ya que evidencia mejor la respuesta agronómica del cultivo al nivel hídrico al que fue sometido. Por otra parte, el estado hídrico de la planta no depende exclusivamente del nivel de humedad del suelo, controlado generalmente con el riego, sino además del requerimiento evaporativo que incide en la tasa de transpiración (Intrigliolo, 2011).

El estado hídrico de la planta puede ser monitoreado mediante el potencial hídrico foliar o potencial al tallo (Ψ_t), expresado en Mega pascales (MPa) y medido con la cámara de presión de Scholander (Arévalo, 2011). Existen diversas alternativas automatizables para medir el potencial de la planta: transductor de desplazamiento lineal (LVDT), sensores flujo de savia, sensor infrarrojo térmico, cámaras termográficas de mano y en aviones no tripulados (Intrigliolo, 2011).

Cuando hay condiciones de sequía en el suelo, disminuye el potencial hídrico de la raíz y las hojas. El potencial hídrico foliar en rosa usualmente varía entre -0.4 y -1.0 MPa, dependiendo de la radiación y la etapa de crecimiento, mientras que en rosa "Forever Yours" mostro marchitamiento a un potencial de -1.3 MPa (Raviv y Blom, 2001). Sotelo *et al.,* (2011). Sholander *et al.,* (1965) desarrollaron un método que permite la medición del potencial hídrico, determinando la presión de la savia en el xilema de las plantas vasculares, aplicando presión sobre una hoja cortada hasta que el agua del xilema se devuelve al extremo del corte del peciolo. Se explica que la presión positiva ejercida sobre la hoja equivale a la presión negativa o tensión a la cual el agua se encontraba retenida. Un método ampliamente aceptado para medir el potencial hídrico al tallo en gran variedad de plantas es mediante la cámara de presión de scholander. El potencial hídrico al tallo Ψ_t se determina midiendo directamente sobre hojas transpirantes, en horas de máxima iluminación, cuando la planta se encuentra en plena actividad, envolviendo la hoja, al menos dos hora antes de la medición, en una bolsa plástica recubierta de papel aluminio para impedir el paso de la luz, evitando que la hoja transpire (Arévalo, 2011; Ferreyra *et al.,* 2007).

El uso de la cámara de presión tiene aplicativos de gran valor, como el estudio de la tolerancia a la sequía o la eficiencia en el uso del agua que muestran diferentes especies (Díaz, 2015). También proporciona información completa acerca del estado hídrico de la hoja, a través de la relación presión-volumen (curva presión volumen), que consiste en aplicar presión adicional con la cámara, por encima de la presión de equilibrio inicial de manera progresiva, midiendo en diferentes tiempos el peso fresco y el potencial de la hoja, hasta que las variaciones en la pérdida de agua y del potencial sean mínimas. Esta curva permite determinar diferentes parámetros hídricos en los tejidos: contenido hídrico total, relación peso turgente/peso seco, contenido relativo de agua (CRA), contenido hídrico apoplástico y simplástico, presión osmótica a turgencia cero, y módulo de elasticidad (Polanía *et al.,* 2003).

2. Materiales y métodos

2.1 Características del área de estudio

2.1.1 Localización

El experimento se desarrolló entre Agosto y Noviembre de 2014 (14 semanas de la 35 a la 48), en la finca SANTA MARIA (propiedad THE ELITE FLOWER), localizada en el municipio de Facatativá, Cundinamarca-Colombia, con coordenadas 4°46’50.3”N, 74°19’18.0”W y 2586 m.s.n.m. (Figura 2-1). La zona de estudio tiene influencia de la subcuenca del río Bogotá, de dos unidades hidrográficas, la 14 (mesocuenca de los ríos Balsillas y Bojacá) y la (mesocuenca del río Subachoque) (IGAC, 2000).

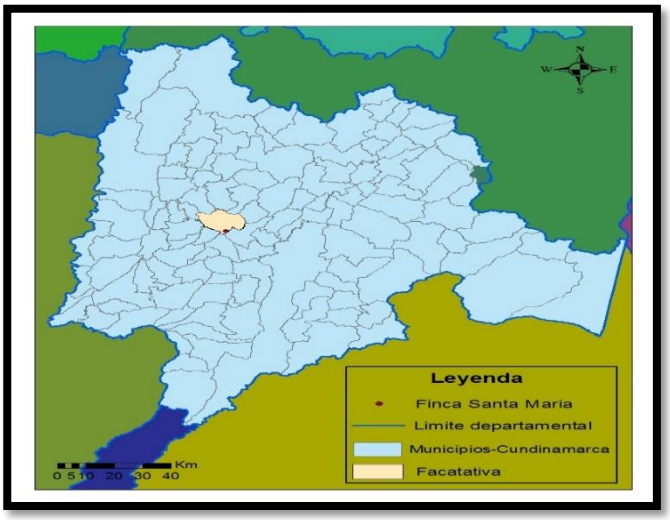

Figura 2-1 Ubicación geográfica Finca Santa María en el municipio de Facatativá (Cundinamarca).

.

2.1.2 Clima

Según el modelo Caldas-Lang la zona es Frio Seco, con temperatura media anual de 13,6°C, máximas de 22°C y mínimas de 6°C; los vientos habitualmente soplan en sentido

sur-este, con velocidades medias de 2,6 m s^{-1}; humedad relativa del 76%, precipitación anual por debajo de 650 mm y evapotranspiración real entre 630 y 640 mm $año^{-1}$ (IGAC, 2012).

2.1.3 Material vegetal

El cultivo de estudio fue *Rosa sp* variedad Vendela (Figura 2-2), sembrada en 2013, en camas elevadas en sustrato, dentro de un esquema de producción continua, en todos los estados fenológicos.

Figura 2-2 Cultivo de Rosa sp, variedad Vendela.

2.1.4 Riego

El equipo de riego está compuesto por:

- Dos (2) bombas eléctricas de 24 y 18 HP (Figura 2-3)
- Controlador de riego Galileo WEX.
- Cinco (5) filtros de grava
- Dos (2) filtros de anillos
- Tres (3) tanques para fertilización de 1000 litros
- Inyectores Venturi, con dos (2) bombas Booster de 1.5 HP
- Medidores de fertilizante
- Válvulas Sirai
- Tres (3) válvulas volumétricas

- Tuberías en pvc de 4”, 3” y 2”
- Electroválvulas con apertura automática
- Las camas utilizan dos (2) líneas de goteo uniram®, de 16mm de diámetro, con emisores de 1.0 lh^{-1}, espaciados cada 0.2m.

Figura 2-3 Reservorio y electrobombas con tuberías de succión y descarga.

2.1.5 Sustrato

Conformado en un ochenta (80) por ciento de cascarilla de arroz tostada y veinte (20) por ciento de compost.

La caracterización del sustrato (granulometría, densidad real, densidad aparente, porosidad total, conductividad hidráulica saturada y curva de retención de humedad) se realizó en los laboratorios de suelos de la Facultad de Ingeniería, departamento de Ingeniería Civil y Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia, antes de iniciar los tratamientos y a la mitad del experimento.

- **Propiedades hidrofísicas del sustrato**

Dado que el volumen de aplicación de agua en cultivos en sustrato depende tanto de las necesidades hídricas del cultivo como de ciertas propiedades del mismo, es necesaria su caracterización, de manera que sirva como base en la determinación de la frecuencia y cantidad de agua a aplicar en cada pulso de riego (Bolla A et al., 2010).

La cascarilla de arroz es un sustrato orgánico, de baja capacidad de retención y lenta descomposición (Mora L, 1999). Al caracterizar el sustrato se puede conocer el movimiento del agua, el cual se encuentra estrechamente relacionado con el espacio poroso; al variar este espacio, la capacidad de retención de agua y aire se modifican, influyendo directamente en la disponibilidad del agua para la planta. Conociendo la curva de retención de humedad se entiende el manejo de la frecuencia de los pulsos de riego y el volumen de estos.

Distribución Granulométrica: De nueve camas de manera aleatoria, se tomaron muestras disturbadas (150-200g) a 15 cm de profundidad. Se secaron por 24 horas en el horno, a una temperatura de 60°C. La determinación del tamaño de partícula se realizó con un tamizador mecánico (mlw THDR9), con tamices de 7.0, 5.0, 2.0, 1.0, 0.8, 0.63, 0.4, 0.2, 0.1 mm, y el fondo (Figura 2-4). El porcentaje de partículas retenidas en cada tamiz se determinó con el peso del material.

Figura 2-4 Juego de tamices.

Densidad real (d_r): Se determinó por medio del picnómetro (Figura 2-5), mediante la metodología que comúnmente es utilizada en laboratorios para hallar el peso específico en los suelos. Como el líquido utilizado en la prueba fue agua destilada, la relación entre los valores de peso específico y densidad real resultan similares, para las temperaturas registradas durante el ensayo (20-21°C) (Ecuación 2-1):

$$G_s = \frac{W_0 \times K}{W_0 \times W_2 \times W_1} \qquad \text{Ecuación } 2-1$$

Donde:

G_s= densidad real del sustrato

k=factor de corrección basado en el peso específico del agua a 20°C

w_0=peso de sustrato seco (g)

w_1= peso del picnómetro +agua +sustrato

w_2 =peso del picnómetro más agua a la temperatura del ensayo (curva de calibración)

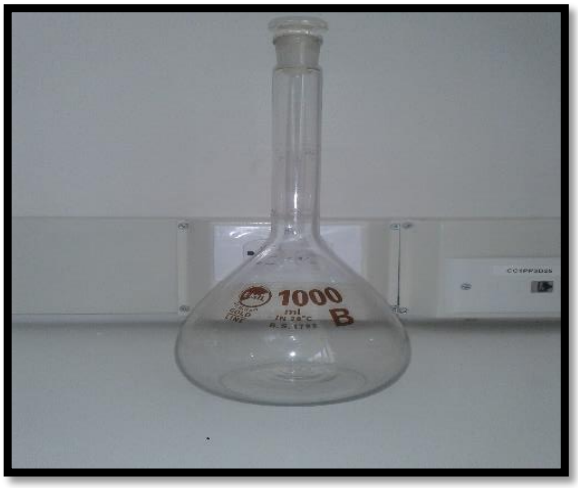

Figura 2-5 Picnómetro

Densidad aparente (***d_a***)*:* Se utilizó el método de la probeta (Ecuación 2-2), la capacidad del instrumento utilizado fue de 100 ml y precisión ±1 ml (Figura 2-6)

$$d_a = \frac{M}{V} \qquad \text{Ecuación } 2-2$$

Donde:

d_a= densidad aparente (g ml^{-1})

M= masa de suelo seco (g)

V= volumen de la probeta (ml)

Figura 2-6 Probeta con sustrato.

Porosidad Total* (PT):* Se obtuvo a partir del cálculo previo de la densidad real ($\boldsymbol{d_r}$) y la densidad aparente ($\boldsymbol{d_a}$), mediante la Ecuación 2-3.

$$PT(\%) = \left(1 - \frac{da}{dr}\right) \times 100 \qquad \text{Ecuación } 2-3$$

Curva de Retención de Humedad*:* Se tomaron dieciocho (18) muestras de manera aleatoria sin disturbar, una por cama, a una profundidad entre 13 y 17 cm, utilizando cilindros de acero galvanizado de 5 cm de diámetro y 4 cm de altura, ubicados al interior de un cilindro base de acero galvanizado de 2“de diámetro y 15 cm de largo, biselado para facilitar la penetración en el sustrato.

Para la determinación de la curva en la mitad del experimento se recolectaron doce (12) muestras, a la misma profundidad, de manera aleatoria, en cuatro (4) camas por tratamiento.

En el laboratorio se saturaron las muestras durante 24 horas, se pesaron, y ubicaron dentro de las ollas de presión (Figura 2-7), sobre platos cerámicos porosos de 1 bar para presiones bajas; previamente saturados por 24 horas. Para construir la curva, las muestras fueron sometidas a cinco presiones (10, 30, 50, 80, y 100 cm de c.a), en cada presión se constató que el sistema llegara al equilibrio, verificando que no se presentara salida de agua de la olla. Finalizado el último punto (100cm de c.a o 10cb) se llevaron las muestras

al horno durante 24 horas a 60°C, para establecer el peso seco y determinar la *humedad gravimétrica* ($\boldsymbol{w_g}$) (Ecuación 2-4).

$$w_g = \frac{peso\ del\ agua}{peso\ de\ sustrato\ seco} \qquad \text{Ecuación } 2-4$$

Teniendo el valor de ($\boldsymbol{w_g}$) y habiendo establecido la densidad aparente de cada muestra, se procede a calcular la *humedad volumétrica* (Ecuación 2-5).

$$w_v = d_a \times w_g \qquad \text{Ecuación } 2-5$$

Figura 2-7 Montaje de las muestras de sustrato en la olla de baja presión.

Después de obtener las curvas, fue necesario hacer un ajuste, para obtener mayor precisión al momento de describir el comportamiento de las presiones a las que se encuentra retenida el agua dentro del sustrato mediante el software RETC (Retention curve).

Conductividad hidráulica saturada* (CHS)*: Se recolectaron nueve (9) muestras, una por cama, tres por tratamiento, con un tubo PVC de 2" de diámetro y 20 cm de largo (Figura 2-8). Se determinó la conductividad hidráulica saturada en laboratorio mediante el método del permeámetro de carga constante (2000). Midiendo el caudal que pasa a través de la muestra saturada (Figura 2-9) La CHS se calculó mediante la ecuación de Darcy en términos de conductividad (Ecuación 2-6).

$$k_s = \frac{Q}{t \times A} \times \frac{l}{l+d} \qquad \text{Ecuación } 2-6$$

Donde:

Ks=conductividad hidráulica saturada

Q= volumen que pasa por la sección (m^3)

A= área de la sección (m^2)

t= tiempo (días)

l= profundidad de la muestra de sustrato (m)

d=altura lámina de agua (m)

Figura 2-8 Toma de muestra para CHS

Figura 2-9 Montaje en laboratorio para determinar CHS

Se saturaron durante 24 horas los cilindros con sustrato, en la parte superior se ubicó una malla evitando perdida de material, adicional a esto fue abierto un orificio de 1 cm de diámetro, aproximadamente 3 cm abajo de la parte superior del cilindro, para conectar la

manguera utilizada en el drenaje del agua, y de esta manera poder garantizar una cabeza constante.

2.1.6 Diseño Experimental

Se utilizó un Diseño Completamente al Azar (DCA), con tres tratamientos y tres repeticiones por tratamiento, cada repetición tuvo tres camas, considerando la cama como unidad experimental, para un total de nueve camas por tratamiento (Figura 2-10). En todas las camas se evaluó producción, calidad y crecimiento de los tallos florales.

- **Tratamientos**

Tres láminas de riego, un tratamiento control T1 equivalente al 100% de la evapotranspiración del cultivo (ETc), un T2 equivalente al 80% de T1 y un T3 equivalente al 65% de T1. Cada tratamiento se asoció a una válvula de riego, T1 a la válvula 8, T2 a la válvula 7 y T3 a la válvula 6, cada válvula aplicaba el volumen de riego correspondiente al tratamiento.

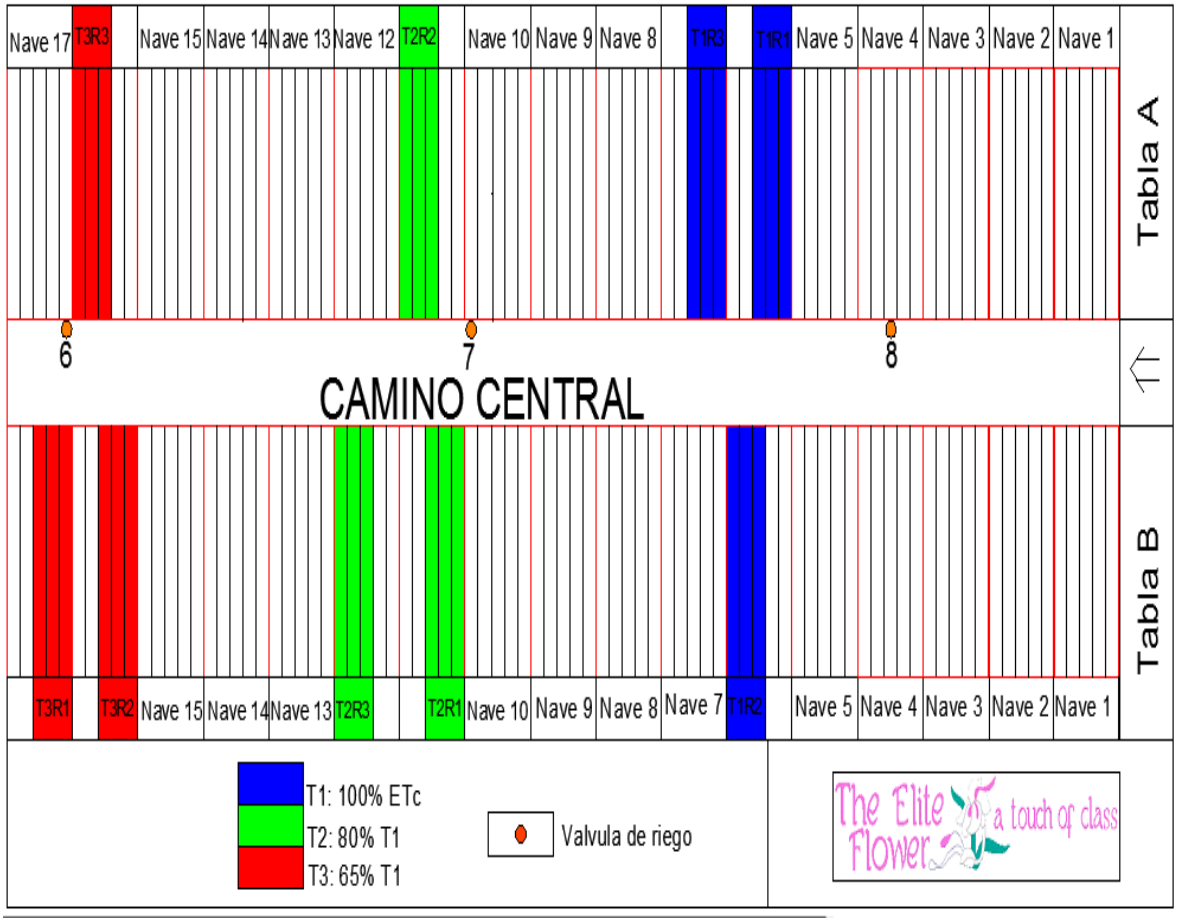

Figura 2-10 Esquema general distribución de tratamientos.

2.1.7 Manejo del riego

Durante el periodo de experimentación el riego fue programado por volumen, diariamente, utilizando un controlador Galileo WEX que accionaba las tres electroválvulas (Figura 2-11).

Figura 2-11 Controlador de riego Galileo WEX.

2.2 Métodos y técnicas utilizadas

2.2.1 Requerimientos hídricos del cultivo

- **Evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) y Evapotranspiración del cultivo (ETc)**

A través de la metodología establecida por (Allen, *et al.,* 2006) se determinó la evapotranspiración del cultivo (ETc) (Ecuación 2-7), para el cálculo se utilizó un valor fijo de coeficiente de cultivo (kc), establecido en 0.94, recomendado por Rodríguez, M. (1998) para programación del riego y optimización de la producción con una lámina mínima de drenaje.

$$ETc = ETo \times kc \qquad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

ETo = evapotranspiración del cultivo de referencia (mm dia^{-1})

kc = coeficiente de cultivo

ETc = evapotranspiración del cultivo (mm dia^{-1})

La ETo se determinó diariamente, con lecturas directas, mediante un atmómetro de 1 mm de precisión, entre las 7:00 -7:30 a.m.

Se situó en el invernadero 2B, en la parte central, ajustándose a una base de madera, para posicionarse a la altura promedio del dosel del cultivo (Figura 2-12).

Figura 2-12 Atmómetro.

Los valores de ETo medidos con el atmómetro se compararon con los de la estación meteorológica Base Aérea Madrid número 21205770, localizada en el municipio de Madrid (Cundinamarca), próxima a la zona del cultivo, obtenidos a partir de la medida del tanque tipo A, con coeficiente de tanque (k_t) de 0.75, mediante el procedimiento descrito en la serie FAO de riegos y drenajes boletín 56 reportado por Allen*, et al*. (2006).

- **Volumen de agua aplicada**

El volumen diario de riego se determinó mediante el cálculo del uso consuntivo (UC) y del factor de corrección de porcentaje de drenaje (FCD) (Ecuaciones 2-8 y 2-9). Dos parámetros permanecieron fijos durante el estudio, el coeficiente de cultivo (kc) y el porcentaje de área sombreada (%A), la evapotranspiración del cultivo de referencia (Eto) y el porcentaje de drenaje (%D) se modificaron diariamente, la eficiencia de riego (η) vario durante el experimento.

$$\mathrm{Ln}_1 = \underbrace{\left(\frac{\mathrm{Et}_0 \times \mathrm{kc} \times \%\mathrm{A}}{\eta}\right)} \times \mathrm{FCD} \qquad \text{Ecuación } 2-8$$

$$\mathrm{Ln}_2 = \left(\frac{\mathrm{Ln}_1 \times 10000}{230}\right) \qquad \text{Ecuación } 2-9$$

Donde:

Ln_1= lámina neta (mm día^{-1})

Et_0= evapotranspiración del cultivo de referencia (mm día^{-1})

$\mathrm{k_c}$= coeficiente de cultivo

$\%\mathrm{A}$= porcentaje de área cubierta por la planta

η= eficiencia del sistema de riego

FCD= factor de corrección del porcentaje de drenaje

Ln_2= lámina neta (litros cama^{-1} día^{-1})

10000= metros cuadrados (m^2) equivalentes a una hectárea (ha)

230= número de camas que ocupan una hectárea

Al obtener la lámina neta ($\mathrm{Ln}_{\mathbf{2}}$), se calcula el volumen total, correspondiente a $\mathrm{Ln}_{\mathbf{2}}$ por el número de camas por válvula, y el volumen por pulso, como el cociente del volumen total y el número de pulsos. Dependiendo del volumen de lámina neta por cama, la capacidad del sistema de riego y la jornada diaria de riego, se determinó el número de pulsos para cada tratamiento, buscando tiempos cortos (para drenajes reducidos), inferior a dos minutos y medio, que es el tiempo requerido para neutralizar el pH del agua de riego en caso de superar el nivel establecido, inmediatamente después de la inyección del fertilizante y antes de llegar al emisor.

- **Porcentaje de drenaje (%D)**

Es el resultado del cociente entre la lámina drenada y la lámina neta (Ecuación 2-10). Para evitar que un incremento excesivo afectara el volumen de riego, se establecieron límites buscando mantener el %D entre el 30 y el 50%.

$$\%D = \frac{L_D}{Ln2} \times 100 \qquad \text{Ecuación } 2-10$$

Donde:

%D=porcentaje de drenaje

L_D= lámina drenada (mm)

$\mathrm{Ln2}$= lámina neta aplicada (mm).

Los rangos para él %D fueron:

-Si %D era mayor al 50%, el valor de (FCD) en la Ecuación 2-8 fue 1.45

-Si %D era menor al 30%, el valor de (FCD) en la Ecuación 2-8 fue 1.35

-Si %D era menor o igual al 50%, y mayor o igual al 30%, el (FCD) tuvo el mismo valor en la Ecuación 2-8.

- **Volumen de agua drenada y coeficiente de cultivo calculado (Kc)**

Para el seguimiento del volumen drenado se instalaron nueve (9) lisímetros de volumen, tres (3) por tratamiento, monitoreando el nivel todos los días (6:30 a.m.-7:30 a.m.). El valor obtenido se utilizó para calcular el porcentaje de drenaje (%D), la evapotranspiración de cultivo del lisímetro (ETi) y el coeficiente de cultivo calculado (Kc). La ETi cuantificada como el balance hídrico, es la diferencia entre el volumen de agua aplicado en el riego y el volumen drenado del lisímetro, tomando como valor constante el cambio de humedad del sustrato (Ecuación 2-11).

$$ET_i = R_i - D_i \pm \theta_i \qquad \text{Ecuación } 2-11$$

Donde:

ETi = evapotranspiración de cultivo del lisímetro (litros)

Ri = riego (litros)

Di = drenaje del lisímetro (litros)

Θi= variación de la humedad del sustrato entre riegos

El coeficiente de cultivo calculado (Kc), es el cociente entre la evapotranspiración de cultivo del lisímetro y la evapotranspiración del cultivo de referencia (Ecuación 2-12).

$$K_c = \frac{ET_i}{ET_o} \qquad \text{Ecuación } 2-12$$

Donde:

Kc = coeficiente de cultivo calculado

ETi = evapotranspiración de cultivo del lisímetro (litros)

ETo = evapotranspiración del cultivo de referencia (litros).

2.2.2 Condición hídrica del sustrato

- **Potencial matricial del sustrato (Ψs)**

El potencial matricial de agua en el sustrato (Ψs), se midió con tensiómetros Irrometer® modelo LT (Figura 2-13), de baja tensión (rango de medición, de 0-40 cbar), uno por

tratamiento, a una profundidad de 19 cm, cada tensiómetro se ubicó en la parte media comprendida entre el borde del contenedor y la línea de goteo, conservando la misma distancia entre dos emisores. Se tomaron tres lecturas durante el día, 7:30 a.m., 10:30 a.m., 13:30 p.m., buscando observar cambios en el comportamiento, conforme a la variación de temperatura al interior del invernadero.

Figura 2-13 Calibración del tensiómetro.

2.2.3 Condición hídrica de la planta

- **Potencial hídrico al tallo (Ψt)**

El potencial hídrico al tallo (ψ_t) se obtiene cuando la planta se encuentra en plena actividad (horas de máxima iluminación), envolviendo la hoja en una bolsa plástica cubierta por papel aluminio (Figura 2-14), por lo menos dos horas antes de las mediciones (Vélez et al., 2007), para impedir el paso de la luz, bloqueando de esta manera la transpiración de la hoja. La medición que tuvo una frecuencia semanal se realizó con la cámara de presión de Scholander modelo 600® PMS Instrument Company (Figura 2-15), al medio día, a cuatro (4) hojas por repetición, doce (12) por tratamiento.

Figura 2-14 Embolsado de la hoja antes de realizar el ensayo.

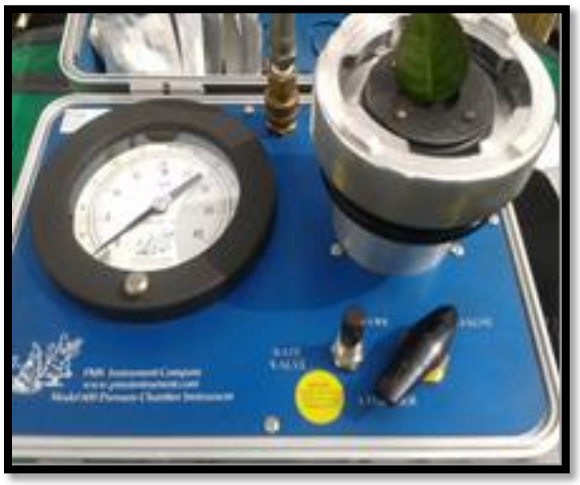

Figura 2-15 Cámara de presión con una hoja lista para medición del ψ_t.

Para ver el efecto sobre el ψ_t midiendo la temperatura y humedad relativa, se calculó la presión de vapor de saturación (PV_{sat}) (Ecuación 2-13) y en el aire (PV_{aire}) (Ecuación 2-14). La diferencia representa el déficit de presión de vapor (DPV) (Ecuación 2-15).

$$PV_{sat} = 0{,}610 * \exp[(17{,}27 * T) \,/\, (237{,}3 + T)] \qquad \text{Ecuación } 2-13$$

$$PV_{aire} = (HR \,/\, 100) * PV_{sat} \qquad \text{Ecuación } 2-14$$

$$DPV = PV_{sat} - PV_{aire} \qquad \text{Ecuación } 2-15$$

Donde:

T= temperatura ambiente dentro del invernadero (°C)

HR= humedad relativa (%)

PV_{sat}= presión de vapor de saturación del aire (kPa)

PV_{aire}= presión de vapor en el aire (kPa)

DPV= déficit de presión de vapor (kPa)

- **Curva presión volumen**

Al finalizar el segundo ciclo de medición, fueron seleccionadas 15 hojas por repetición totalmente desarrolladas e hidratadas de manera inmediata por un periodo de 24 horas, en recipientes cubiertos con papel aluminio para evitar la entrada de luz y pérdida por transpiración. Transcurridas 24 horas se determinó el potencial hídrico mediante la cámara de presión Sholander y su peso fresco con una balanza electrónica de precisión XT220A (Figura 2-16).

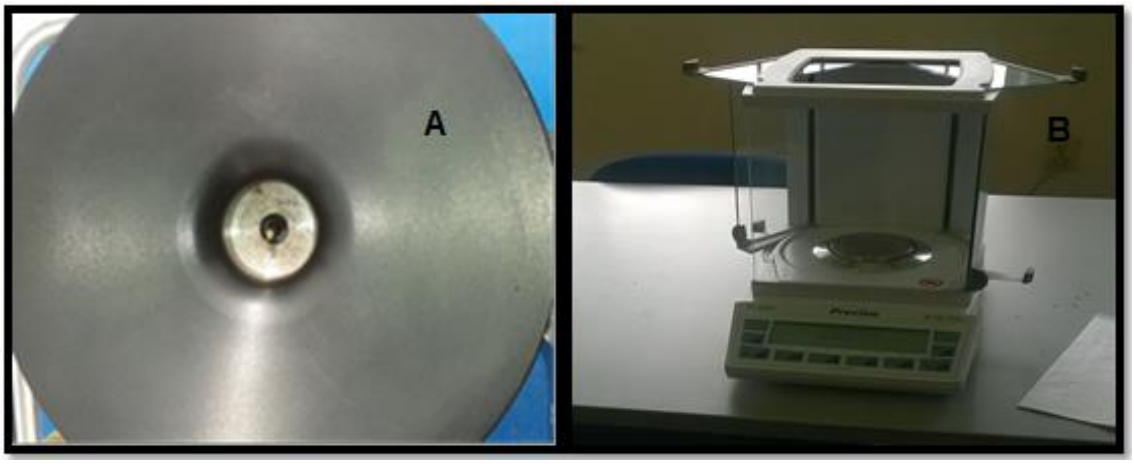

Figura 2-16 Determinación del potencial hídrico en hojas saturadas (A), y peso fresco (B).

La secuencia de medir el potencial y pesar cada hoja se repitió durante la deshidratación del tejido bajo condiciones ambientales, hasta encontrar un mínimo de variación en la pérdida de agua y de potencial.

Figura 2-17 Esquema del seguimiento a hojas durante el proceso de deshidratación y medición del potencial hídrico

Al finalizar el anterior procedimiento la totalidad de las hojas fueron llevadas al horno durante 48 horas, para determinar el peso en seco y finalmente calcular el contenido relativo de agua (%CRA) (Ecuación 2-16) y el contenido hídrico total (%CHT) (Ecuación 2-17).

$$CRA\ (\%) = \frac{Peso\ fresco - Peso\ seco}{Peso\ saturado - Peso\ seco} \times 100 \qquad \text{Ecuación } 2-16$$

$$CHT\ (\%) = \frac{Peso\ saturado - Peso\ seco}{Peso\ saturado} \times 100 \qquad \text{Ecuación } 2-17$$

A partir de los datos obtenidos se graficó el inverso del potencial de la hoja $(^{1}/_{\Psi})$ en el eje de las ordenadas contra el contenido relativo de agua (CRA) en el eje de las abscisas y así tener las curvas presión-volumen por cada repetición de los tres tratamientos (Figura 2-18). Inicialmente la curva tiene una tendencia cuadrática o exponencial, y posteriormente, cuando la presión de turgencia se anula, se torna rectilínea (Polanía *et al.,* 2003).

Para ajustar la curva se utilizó la ecuación de la hypérbola modificada II (Ecuación 2-18)

$$f = \frac{x}{(a + b * x)} \qquad \text{Ecuación } 2-18$$

Mediante la extrapolación del punto de la curva en que esta comienza a ser lineal hasta CRA =0, se determinó el inverso del potencial osmótico en el punto de pérdida de turgencia ($^{1}/_{\psi_{oppt}}$) a través de una recta paralela al eje de las abscisas, y el contenido relativo de agua en el punto de pérdida de turgencia (CRA_{ppt}), mediante una recta paralela al eje de las Y, hasta $^{1}/_{\Psi} = 0$ (Figura 2-18). El inverso del potencial osmótico saturado ($^{1}/_{\psi_{os}}$) se estableció extrapolando la parte de la curva que es lineal hasta el eje de las ordenadas (Corcuera, 2003). A partir de $^{1}/_{\psi_{os}}$se trazó una línea recta interceptando la curva y extendiendola hasta llegar a un punto del eje de las X donde $^{1}/_{\Psi}$ era cero (Rodríguez *et al.,* 2012), y de esta manera determinar los siguientes parámetros:

Contenido relativo de agua apoplástica, CRAa (%): El CRA_a se refiere al agua apoplastica que hace parte de los tejidos en (%). Se determina como el valor donde 1/Ψ es igual a 0 y la recta intercepta el eje de (%CRA).

Contenido relativo de agua simplástica, CRAs (%): El CRA_s se refiere al agua que se utiliza para el transporte en (%) y se determina como 100 - CRA_a.

Módulo de elasticidad, ϵ (MPa): El módulo de elasticidad suministra una idea de la rigidez de las paredes celulares en cuanto mayor sea, mayor será la resistencia de la pared celular a la deformación (Azcón-Bieto y Talon, 2001) y se determinó de acuerdo a la Ecuación 2-19.

$$\epsilon\ (MPa) = \frac{(\psi_{os} - \psi_{oppt}) * (100 - CRA_a)}{(100 - CRA_{ppt})} \qquad \text{Ecuación } 2-19$$

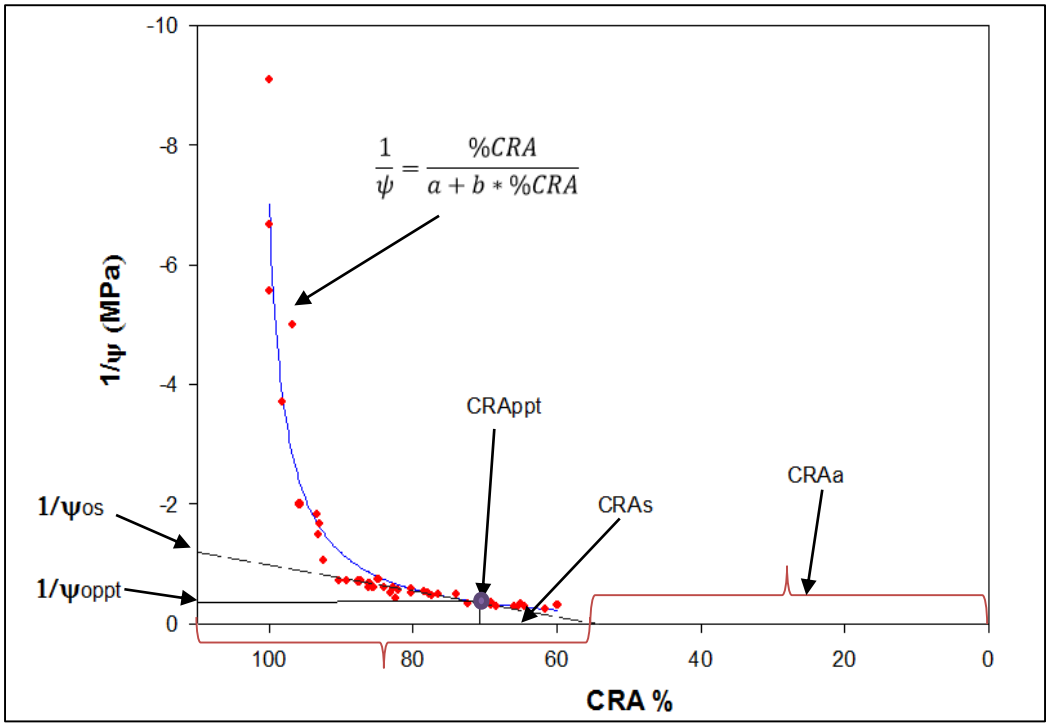

Figura 2-18 Parámetros hídricos de la Curva presión –volumen.

2.2.4 Datos climáticos y grados días de crecimiento (GDC)

La temperatura (°C) y humedad relativa (%) fueron medidas diariamente por un sensor Datalogger Wacths Dog® (Figura 2-19), en intervalos de 30 minutos, para determinar el déficit de presión de vapor al interior del invernadero, y la acumulación de grados días de crecimiento (GDC).

Para calcular la acumulación de grados días de crecimiento se siguió la metodología descrita por Rodríguez y Flórez, (2006), con temperaturas bases de 5.3 y 30°C como limites inferior y superior, respectivamente. Las temperaturas se ajustaron de la siguiente manera: si el dato se encontraba entre los límites inferior y superior, se restaba a dicho valor 5.3°C, de tal manera que los datos iguales o inferiores a 5.3°C tomaban el valor de cero como umbral inferior, y los datos iguales o superiores 30°C recibieron el umbral superior de 24.7°C. Con los datos de temperatura ajustados se procedió a promediar por día (Ecuación 2-20).

Figura 2-19 Sensor WatchDog para registro de temperatura y humedad relativa.

$$GDC = \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2}\right) - T_{base} \qquad \text{Ecuación } 2-20$$

Donde:

T_{max}= temperatura máxima diaria del aire (°C)

T_{min}= temperatura mínima diaria del aire (°C)

T_{base}= temperatura en que el proceso de interés no progresa (°C)

2.2.5 Determinación del área foliar

Fue medida cada quince días, en tres (3) hojas por cama, nueve (9) por repetición y veintisiete (27) por tratamiento, con un scanner modelo 3100 LI-COR® (Figura 2-20), ubicado en el Laboratorio de Fisiología Vegetal de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia. Las hojas seleccionadas (cuarta a sexta hoja verdadera) se encontraban ubicadas en el tercio medio de tallos con igual estadio fenológico (‘rayar color’), en el cual los sépalos iniciaban la separación del botón floral.

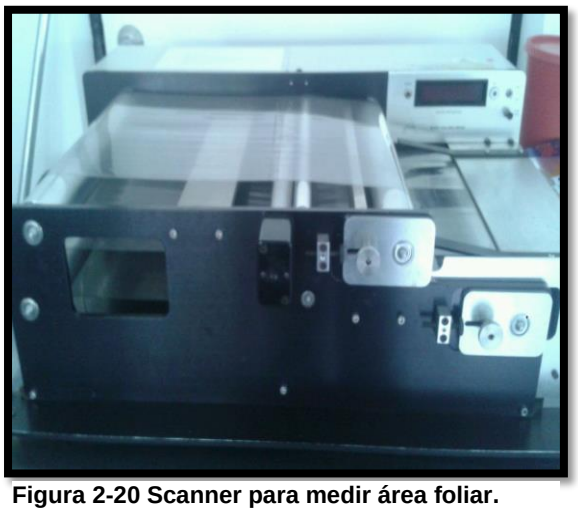

Figura 2-20 Scanner para medir área foliar.

2.2.6 Calidad cosecha y crecimiento del cultivo

La calidad de los tallos determina en gran parte el valor comercial, por ello la importancia de su control y registro. Se midieron semanalmente la longitud y diámetro del tallo y del botón con un flexómetro STANLEY® y un calibrador pie de rey DISCOVER®, en ocho (8) tallos por cama, setenta y dos (72) por tratamiento.

El seguimiento del crecimiento se hizo durante dos periodos o ciclos del cultivo, el primero inicio en la semana 35 y el segundo en la 39, aproximadamente durante nueve semanas por ciclo. Se marcaron treinta y seis (36) tallos por tratamiento (Figura 2-21). Los tallos seleccionados oscilaron entre los 3 y 7 cm de longitud (aproximadamente 15 a 18 días después del corte). La medición se realizó en la fase vegetativa en “hojas”, y reproductiva en “palmiche”, “arroz”, “arveja”, “garbanzo”, “doble garbanzo”, “rayar color” y “punto de corte”.

Figura 2-21 Marcación de tallos vegetativos para seguimiento del primer ciclo.

2.2.7 Producción de tallos florales

Para determinar la producción se tomó una cama como unidad experimental de cada tratamiento y repetición, contabilizando el número de tallos cosechados por tratamiento, con una frecuencia diaria, desde la semana 36 hasta la semana 48.

2.2.8 Eficiencia en el uso del agua (EUA)

La eficiencia en el uso del agua (EUA) es un parámetro que permite cuantificar la cantidad de agua utilizada al obtener determinada producción de un cultivo (Arévalo, 2011), estableciéndose mediante la relación entre el número de tallos cosechados y el volumen de agua aplicada (Ecuación 2-21).

$$EUA = \left(\frac{NTC}{Vol}\right) \qquad \text{Ecuación } 2-21$$

Donde:

EUA = Uso eficiente de agua (#tallos/m³)

NTC = Numero de tallos cosechados por tratamiento

Vol = Volumen de agua aplicada por tratamiento (m³)

2.2.9 Incidencia de plagas y enfermedades

La incidencia de plagas y enfermedades es un factor que afecta la calidad final y la producción del cultivo de *Rosa sp*. Se hizo seguimiento a las principales plagas y enfermedades (ácaros, mildiu velloso y mildiu polvoso) de acuerdo con las especificaciones del departamento de manejo integral de plagas y enfermedades (MIPE).

En mildiu velloso la ocurrencia está sujeta al número de foliolos afectados por planta, categorizada en grados, donde grado uno y tres son los niveles leve y crítico, respectivamente. En mildiu polvoso y ácaros la planta se dividió en tercios, donde la mayor incidencia estaba dada por el tercio tres, presentándose cuando el nivel de afección alcanzaba el botón floral.

2.2.10 Parámetros de riego

La CE, el pH y el contenido de nitratos (N-NO3) son parámetros de riego que permiten identificar condiciones favorables o perjudiciales para el crecimiento y desarrollo del cultivo. La CE determina el nivel de salinidad, en rosa conductividades superiores a 3.5 dSm^{-1} afectan la calidad y producción; de igual forma bajo condiciones de acidez o alcalinidad la planta se ve afectada en su crecimiento y desarrollo, puesto que los efectos del pH se ven principalmente en la disponibilidad de los nutrientes, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la actividad biológica (Quintero, 2009). En el mismo sentido el exceso de nitratos representan una seria amenaza, causando toxicidad en las plantas y contaminación en los cuerpos de agua.

Los rangos establecidos en los que se deben mantener estos parámetros antes de llegar al emisor son: CE (1.5 a 2.0 mmhos/cm), pH (5.5 a 6.0) y NO3 (120 a 130 ppm). Se tuvo una frecuencia de medición diaria en tres puntos: emisor, sustrato y lixiviado.

Para medir la CE y el pH se utilizó un equipo Combo Hanna (Figura 2-22), el nivel de los nitratos fue determinado mediante el medidor Horiba (Figura 2-23).

Figura 2-22 Combo Hanna

Figura 2-23 Medidor Horiba

2.2.11 Análisis estadístico

Los resultados fueron analizados mediante estadística descriptiva, con correlaciones y regresiones no lineales, análisis de varianza (ANOVA) y prueba de comparación de medias por el método de Duncan, con nivel de significancia del 5%, utilizando el programa IBM® SPSS® Statistics 2013.

3. Resultados y discusión

3.1 Propiedades hidrofísicas del sustrato

3.1.1 Distribución granulométrica

Los valores medios obtenidos de la distribución de tamaños de partículas antes de iniciar y durante los tratamientos mostraron que la mayor cantidad de peso retenido se encontró en los tamices con apertura, 1 y 2 mm respectivamente, los tamices de 5 y 0.1 mm retuvieron la menor cantidad de material (Tabla 3-1). No se encontraron diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Duncan con $p< 0.05$.

Tabla 3-1 Fracciones granulométricas obtenidas antes de iniciar y durante los tratamientos T1, T2 y T3. Valores con la misma letra indican que no hubo diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05).

Apertura tamiz (mm) / %	7	5	2	1	0.8	0.63	0.4	0.2	0.1	<0.1
Antes	1.48	0.82	20.22	42.48	8.12	7.34	7.91	6.81	0.89	3.92
T1 (100%ETc)	0.41a	0.17a	11.85a	43.33a	10.73a	8.00a	8.86a	6.71a	0.97a	8.97a
T2 (80%T1)	1.33a	0.49a	21.09a	44.50a	8.49a	6.09a	6.85a	4.39a	1.11a	5.66a
T3 (65%T1)	0.60a	0.59a	15.56a	44.62a	11.52a	7.91a	7.98a	5.10a	0.64a	5.49a

Según Martínez y Roca (2011), se consideran materiales gruesos aquellos que poseen partículas mayores de 0.9 mm, coincidiendo con el sustrato empleado, puesto que el mayor

número de partículas fue retenido en los tamices 1, 2, 5 y 7 mm, con la mayor cantidad retenida por el tamiz de 1mm, con porcentajes entre el 43 y el 45% para los tres tratamientos, diferente a lo encontrado por (Quintero, 2009) en un sustrato 100% cascarilla de arroz quemada (CAQ), predominando la retención en la fracción 0.63-0.32 mm, y similar a lo reportado por Abad y Noguera (1998), como tamaño óptimo de partículas entre 2.5 y 0.5 mm para sustrato en contenedor, concentrado el 74, 80 y 79% de partículas retenidas por los tamices de 2, 1, 0.8 y 0.63 mm el T1, T2 y T3 respectivamente . Las partículas más finas se encontraron en el fondo (pasando el tamiz de menor apertura, 0.1mm) con porcentajes entre el 5 y el 9% para todos los tratamientos. Materiales de textura gruesa, como el sustrato de la investigación, que tienen tamaños de partículas superiores a 1 mm y con poros grandes (> 100 µm), son bien aireados, pero retienen cantidades reducidas de agua (Quintero *et al*, 2011).

3.1.2 Densidad real, aparente y porosidad total

La Tabla 3-2 presenta los valores medios obtenidos antes de iniciar y durante los tratamientos; para densidad real, aparente y porosidad total.

Tabla 3-2 Valores medios de densidad real, densidad aparente y porosidad total antes de iniciar y durante los tratamientos T1, T2 y T3. Valores con diferente letra indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05).

Propiedad/ media	Densidad real (g ml^{-1})	Densidad aparente (g ml^{-1})	Porosidad total (%)
Antes	1.64	0.14	91.38
T1 (100%ETc)	1.46a	0.19a	86.95a
T2 (80%T1)	1.58a	0.14b	91.10a
T3 (65%T1)	1.53a	0.16a	89.49a

El comportamiento de la densidad real entre tratamientos no presento diferencias significativas (p<0.05) de acuerdo a la prueba de Duncan.

Los valores de densidad real fueron elevados comparados con los reportados en Colombia para cascarilla de arroz quemada por Quintero (2009) y Meneses (2004), de 0.77 y 1.16 g ml^{-1} respectivamente, menores al reportado por Oliveira *et al.,* (2002), de 1.90 g ml^{-1}, y muy cercanos al valor medio sugerido por Ansorena (1994), para compuestos orgánicos de 1.50 g ml^{-1}. La diferenciación en los valores se puede explicar por el grado de quemado de la cascarilla, además el material utilizado en el presente estudio no es 100% CAQ, sino una mezcla de 80% CAQ con un 20% de compost.

La densidad aparente del tratamiento T1 con el T2 presentó diferencia significativa ($p<0.05$).

Los valores obtenidos de densidad aparente, validan la afirmación hecha por Abad y Noguera (1998), que al interior de un invernadero, donde el viento no es un factor limitante, la densidad aparente puede ser tan baja como 0.19 g ml^{-1}; contrario al tener plantas que crecen al aire libre, estas deben ser cultivadas con sustratos más resistentes, con densidades aparentes entre 0.50 g ml^{-1} y 0.75 g ml^{-1}.

En Colombia para cascarilla de arroz quemada, Calderón y Sevallos (2001), y Quintero (2009), encontraron un valor medio para densidad aparente de 0.17 y 0.26 g ml^{-1} respectivamente. Meneses (2004), reportó valores comprendidos entre 0.13 y 0.42 g ml^{-1}, rango en el que se hallan los valores medios encontrados en el presente estudio.

No se encontraron diferencias significativas ($p<0.05$) entre tratamientos para porosidad total, y se ajustan al límite inferior del 85%, recomendado por Quintero *et al*. 2011, para sustratos. Las diferencias entre tratamientos se explican por las variaciones encontradas en la densidad real y aparente, resaltando que a pesar de contar con un protocolo de homogenización en la preparación del sustrato, permanece cierto grado de heterogeneidad en la proporción de materiales que lo componen.

3.1.3 Curva de retención de humedad

Los valores de las observaciones empleadas en la construcción de las curvas de retención de humedad (Figura 3-1), así como los valores de los coeficientes iniciales, se ajustaron a partir del modelo de Van Genuchten (VG) con $m = 1 - 2/n$, $m = 1 - 1/n$, y m, n que utiliza el software RETC, resultando un mejor ajuste el tipo de relación $m = 1 - 2/n$. Parámetros finales ajustados: $\propto, n, \theta_s, y\ \theta_r$ con coeficiente de regresión R^2 para T1, T2 y T3 de 0.99.

En la etapa previa a la implementación de los tratamientos se obtuvo un 17, 14 y 3% en volumen de agua total disponible, fácilmente disponible y de reserva respectivamente (Tabla 3-3).

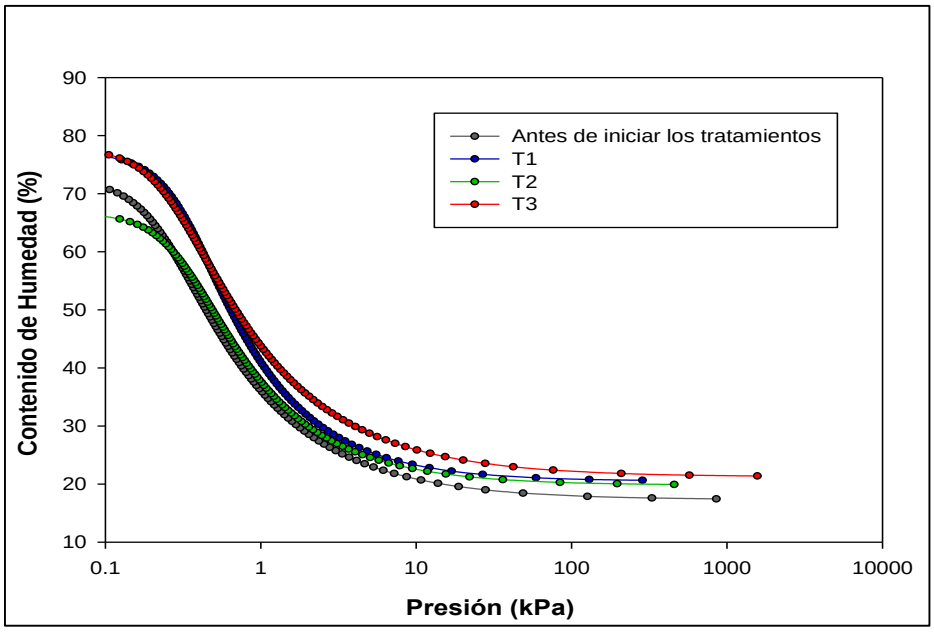

Figura 3-1 Curva de retención de humedad antes de iniciar los tratamientos, y con los tratamientos establecidos.

No se presentaron diferencias significativas ($p<0.05$) entre tratamientos en las curvas de retención de humedad. La curva del tratamiento T3 a presiones superiores de 0.5 kPa presenta mayor contenido de humedad volumétrica, seguida de la curva del tratamiento T1, sin embargo es importante mencionar que a presiones superiores de 1 kPa la planta requiere de un mayor esfuerzo para la succión del agua, señalando que el intervalo de interés con fines de riego y producción, corresponde a las presiones entre 0.1 y 1 kPa.

Tabla 3-3 Valores obtenidos para el agua total disponible (ATD), fácilmente disponible (AFD) y de reserva (AR) antes y durante los tratamientos T1, T2 y T3. Valores con la misma letra indican que no se presentaron diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05).

Propiedad/ media	ATD	AFD	AR
	% volumen		
Antes	16.83a	13.77a	3.07a
T1 (100%ETc)	18.26a	15.51a	2.75a
T2 (80%T1)	15.56a	12.96a	2.60a
T3 (65%T1)	18.27a	15.10a	3.21a

El ATD no presento diferencias significativas (p<0.05) entre tratamientos. (Martínez y Roca, 2011; Kroeff et al., 2002) reportaron como rango ideal entre 24 y 40% para sustratos, mayores a los valores obtenidos y menores al 21% obtenido por Quintero (2009).

El AFD no presento diferencias significativas (p<0.05) entre tratamientos, pero los valores encontrados son menores al rango óptimo de 20 y 30% propuesto por (Abad et al., 2005; Martínez y Roca, 2011), en sustratos, pero mayores, a excepción del tratamiento T2, al reportado por Quintero (2009), de 14%, en cascarilla de arroz quemada.

El AR no presento diferencias significativas (p<0.05) entre tratamientos, con valores por debajo al rango óptimo reportado por (Martínez y Roca, 2011; Kroeff et al., 2002; Nappi y Barberis, 1993) entre 4 y 10%, y al 6 % establecido por Quintero (2009).

La variación en el volumen de agua aplicado en los diferentes tratamientos no afecto significativamente su disponibilidad dentro de los rangos de retención de humedad estudiados, sin embargo se presentó una reducción en el ATD y el AFD entre los periodos de evaluación, antes de iniciar los tratamientos con respecto a los tratamientos T1 y T2. Al tener valores bajos de AFD, como característica propia de los sustratos, se confirma lo

mencionado por Quintero (2009), donde lo ideal para cultivos en contenedor y con riego por goteo es tener una gestión de riego que permita la aplicación de pulsos cortos y frecuentes.

3.1.4 Conductividad hidráulica saturada

La conductividad hidráulica saturada (CHS) antes de establecer los tratamientos fue 320.81 m día^{-1}. Los valores encontrados en los tratamientos T1, T2 y T3 fueron 632.41, 631.36 y 372.31 m día^{-1} respectivamente, sin diferencias significativas ($p<0.05$).

Al comparar el valor medio obtenido de la CHS al inicio de los tratamientos con los encontrados durante la experimentación, se observa que dicho valor es inferior; este incremento en el tiempo puede deberse al crecimiento radicular, al cambio o reajuste en la distribución granulométrica, o a la pérdida de las partículas más finas por lavado.

Los valores de CHS están dentro de los rangos obtenidos por Allaire et al. (2004), para diferentes materiales utilizados como sustratos en tomate, donde determinaron su variación a los 7 meses de establecido el cultivo, y encontrando que para lana de roca la CHS varió de 440 a 302 m día^{-1}, para sustrato a base de aserrín de madera vario de 656 a 622 m·día-1, para sustrato a base de viruta vario de 967 a 1235.52 m día^{-1}, para corteza vario de 578 a 630 m día^{-1}, y mayores a los reportados por Quintero (2009) de 60.9, 75.9 y 64.2 m día^{-1} para 100%CAQ, 65%CAQ+35%FibraCoco y 35%CAQ+65%FibraCoco, respectivamente.

3.2 Variables climáticas

3.2.1 Evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) y del cultivo (ETc)

La evapotranspiración potencial (ETo) medida con el atmómetro fue 1.83 mm, la del tanque tipo A, 2.14 mm, y la del cultivo (ETc) determinada teniendo en cuenta la ETo del atmómetro de1.68 mm de la semana 35 a la 48. La evapotranspiración de cultivo del

lisímetro (ETi) del T3 (1.65 mm), fue diferente significativamente ($p<0.05$) a la de T2 y T1 (1.99 y 2.05 mm).

En el tratamiento T1 la ETi, y la ETo del atmómetro y la del tanque tipo A, de 2.05, 1.83 y 2.14 mm, respectivamente, son muy similares, por consiguiente la ETo se ajustó a las necesidades hídricas del cultivo.

Los valores promedio máximos de ETi en T1 y T2 se presentaron en la semana 47, y en el T3 en la semana 45, donde se presentó la mayor ETo y ETc, contrario a la tendencia general que indica mayores valores de ETi en el tratamiento mejor regado (Figura 3-2), con una alta correlación ($p<0.05$) de Pearson, igual a 0.74, entre los datos obtenidos de ETo y ETi del T1.

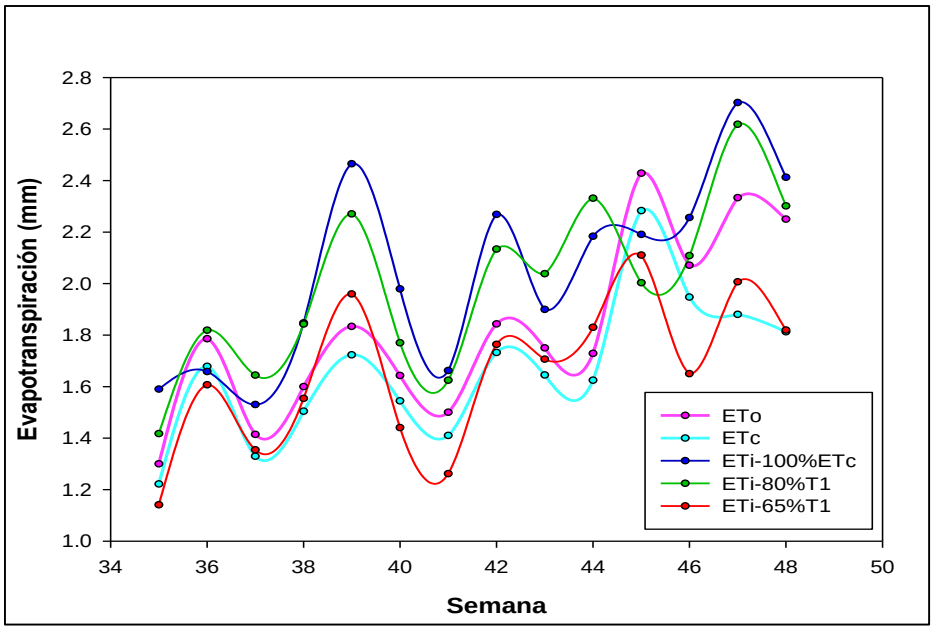

Figura 3-2 Evapotranspiración del cultivo de referencia, ETo, del cultivo, ETc, y evapotranspiración de cultivo del lisímetro, ETi, para los tres tratamientos.

3.2.2 Condiciones ambientales dentro del invernadero

Durante las semanas 36 y 44 se registraron las temperaturas media mínima y máxima, con 17.97 y 20.63°C, respectivamente. El déficit de presión de vapor (DPV) se encontró entre 0.181 y 0.111 kPa, incrementándose cuando la humedad relativa (HR) disminuía. A partir de la semana 40 la HR no estuvo debajo del 69% (Figura 3-3).

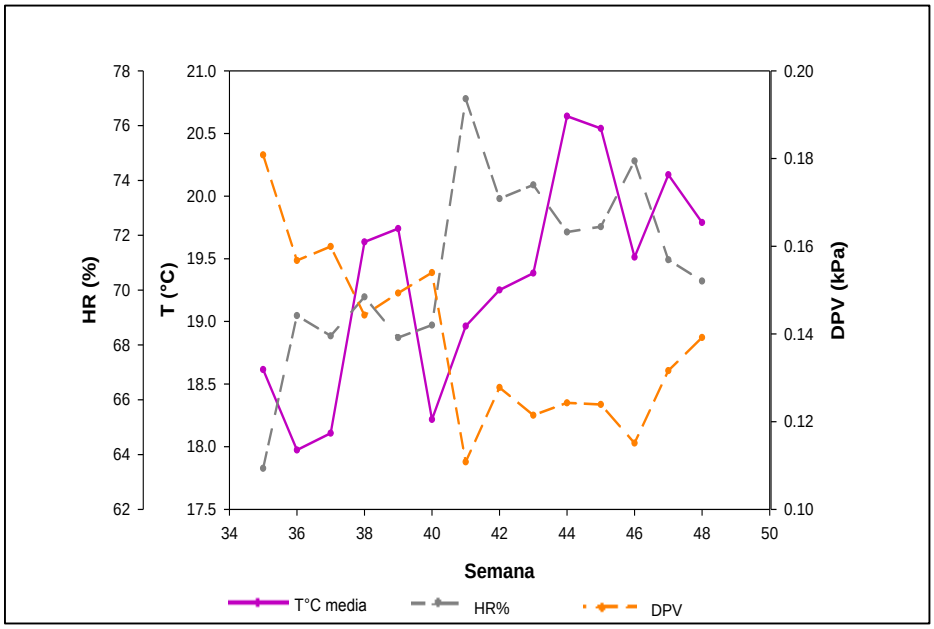

Figura 3-3 Comportamiento semanal medio de la temperatura (T°C), humedad relativa (HR%) y déficit de presión de vapor (DPV).

3.2.3 Acumulación de grados día de crecimiento (GDC)

Los ciclos medidos presentaron un comportamiento similar en la acumulación de grados día^{-1} (Figura 3-4), sin diferencias significativas ($p<0.05$). En el primer ciclo los tallos fueron cosechados entre las semanas 43 y 44, de 79 a 88 días después del corte, al momento de haber acumulado 686.1 y 812.6 grados dia^{-1} respectivamente. Para el segundo ciclo entre las semanas 47 y 48, de 75 a 86 días después del corte, cuando se habían acumulado entre 699.1 y 838.65 grados dia^{-1} respectivamente, cercanos a los rangos descritos por Rodríguez y Flórez (2006), y Arévalo (2011), de 80 a 93 días después del corte, con 779.9 y 892.9 grados dia^{-1} acumulados, y de 77 a 84 días, al haber acumulado entre 751 y 787 grados dia^{-1}, respectivamente, para un cultivo de rosa roja variedad *Freedom*.

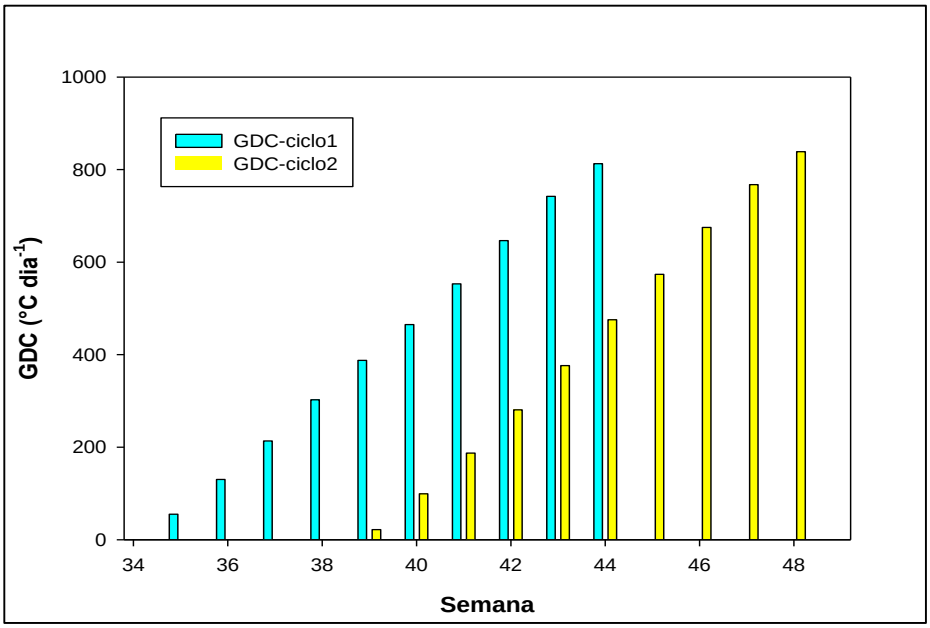

Figura 3-4 Comportamiento de la acumulación grados día de crecimiento (GDC) de los tallos florales en los dos ciclos medidos.

3.3 Volumen de agua aplicada

A partir de la semana 35 iniciaron los tratamientos con una aplicación media de agua de 127.91, 103.45 y 86.51 litros cama^{-1} semana^{-1}, correspondiente a los tratamientos T1, T2 y T3, respectivamente. Después de la semana 44 se presentó un incremento no continuo del volumen de riego, asociado a una mayor ETc (Figura 3-5).

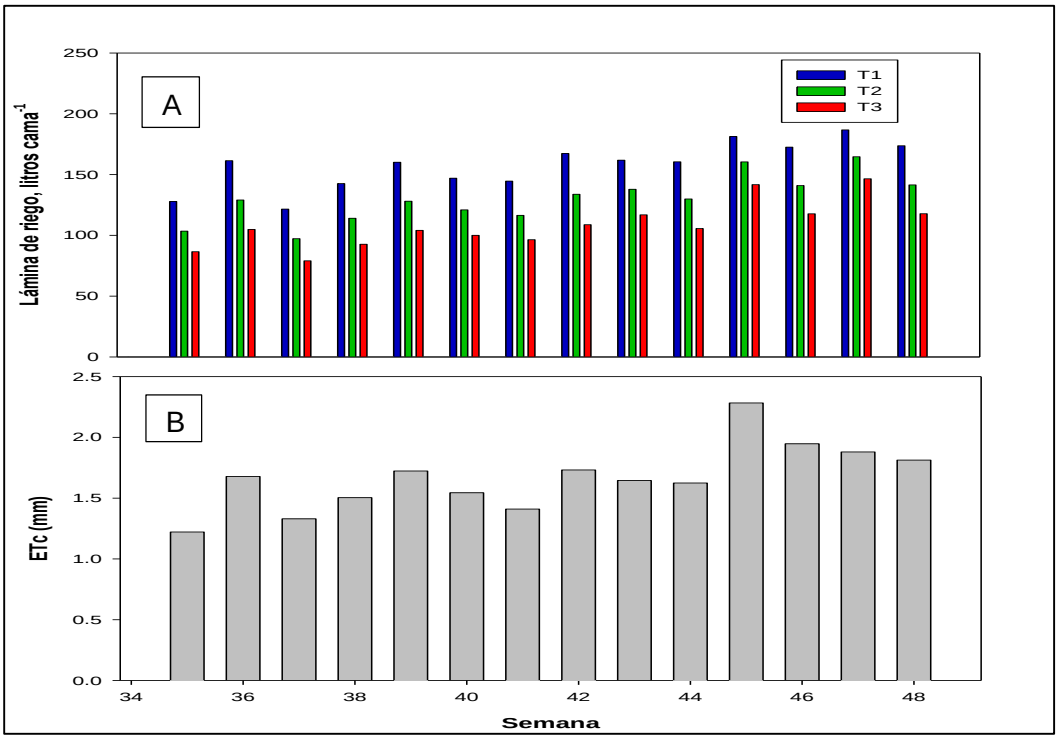

Figura 3-5 A) Volumen de riego aplicado en litros cama^{-1} semana^{-1}, B) evapotranspiración del cultivo (ETc) en mm semana^{-1}.

El volumen total de agua aplicada en los tratamientos T1, T2 y T3 fue de 15.04, 12.39 y 10.35 m^3 cama^{-1}, equivalente a 3.64, 2.99 y 2.51 mm día^{-1}, respectivamente (Figura 3-6), un 17.6 y 31.2% menos que el T1, para T2 y T3, respectivamente, menor a lo reportado por Patiño (2000), en clavel, en sustrato, considerando que el volumen de riego debe estar entre 3.70 y 5.29 mm día^{-1}.

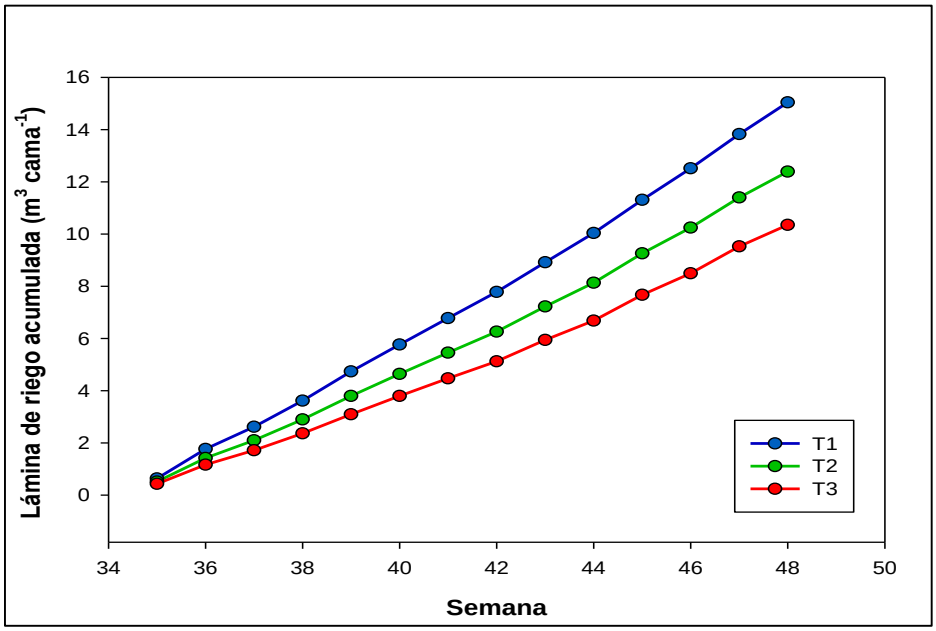

Figura 3-6 Lámina de riego acumulada.

3.4 Volumen drenado

La lámina drenada por tratamientos fue constante durante la evaluación, con excepción de la semana 47 (Tabla 3-4), donde se presentaron interrupciones del riego (lavados de las líneas de goteo) y se generaron diferencias en el drenaje. Los valores promedio de lámina drenada fueron 1.64, 1.00 y 0.82 mm en T1, T2 y T3, respectivamente.

El porcentaje de drenaje (%D) en T2 y T3 fue muy similar (Tabla 3-4), de acuerdo con los valores medios encontrados de 44.30, 32.83 y 31.09 para T1, T2 y T3, respectivamente, sin embargo la diferencia del volumen de riego fue del 15%.

Los %D fueron menores a los reportados por Esmeral (2011), 52.65, 63.17 y 63.14 para tres diferentes mezclas de sustrato, 100%CAQ, 65%CAQ+35%FibraCoco y 35%CAQ+65%FibraCoco, respectivamente, en rosa cv. Charlotte, pero mayores al propuesto por Arreaza (2000) y Meneses (2004) del 5% al 20%, para clavel sembrado en sustrato, y al reportado por Martínez y Roca (2011), del 10 al 30%.

Tabla 3-4 Lámina de agua aplicada (LA), drenada (LD) y porcentaje de drenaje (%D).

Semana	T1 (100%ETc)			T2 (80%T1)			T3 (65%T1)		
	LA (mm)	LD (mm)	%D	LA (mm)	LD (mm)	%D	LA (mm)	LD (mm)	%D
35	2.94	1.35	49.97	2.38	1.13	44.58	1.99	1.00	44.17
36	3.71	2.05	56.33	2.97	1.15	39.17	2.41	0.81	30.72
37	2.80	1.27	38.67	2.24	0.69	24.40	1.82	0.46	24.40
38	3.28	1.43	39.90	2.62	0.78	29.43	2.13	0.58	26.23
39	3.68	1.12	27.62	2.95	0.61	19.67	2.39	0.38	15.57
40	3.38	1.03	33.58	2.78	0.62	27.56	2.30	0.48	25.81
41	3.33	1.69	50.41	2.68	1.05	39.67	2.22	0.91	41.40
42	3.85	1.73	42.83	3.08	1.06	33.00	2.50	0.83	30.37
43	3.72	1.84	51.67	3.17	1.06	35.20	2.69	0.83	38.70
44	3.69	1.92	49.11	2.99	0.95	28.28	2.43	0.84	28.89
45	4.17	2.50	51.67	3.69	1.75	40.43	3.26	1.30	35.17
46	3.97	1.79	43.25	3.24	1.13	32.56	2.71	0.98	35.67
47	4.29	2.30	45.89	3.79	1.52	37.42	3.37	1.71	43.17
48	3.99	1.81	39.39	3.25	1.12	28.58	2.71	0.80	27.20

El %D se ajustó teniendo en cuenta el intervalo preestablecido para usar el factor de corrección del porcentaje de drenaje (FCD) (Figura 3-7), en nueve (9) de las catorce (14) semanas, con medias de 44.30 y 41.60 para el %D y el FCD del T1, respectivamente, ratificando que el manejo del porcentaje de drenaje fue acertado y no genero volúmenes elevados de lixiviado.

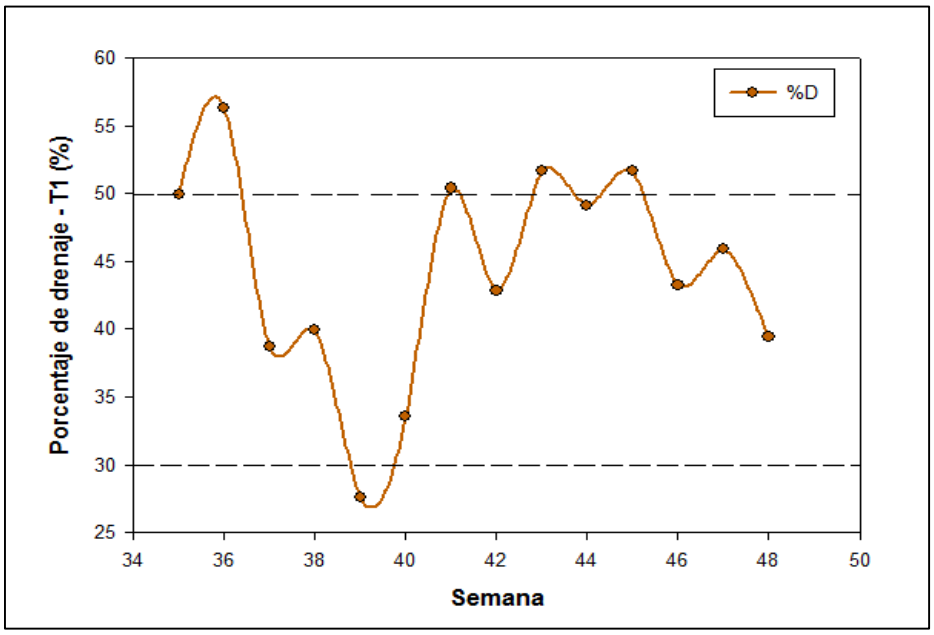

Figura 3-7 Fluctuación del porcentaje de drenaje (%D) en el rango correspondiente al factor de corrección (30-50%).

3.5 Balance hídrico y coeficiente de cultivo calculado (Kc)

Se obtuvo valores medios para la ETi de 1.99, 1.97 y 1.67 mm dia^{-1} en los tratamientos T1, T2 y T3.

El coeficiente de cultivo calculado para T1, T2 y T3, fue 1.15, 1.13 y 0.93, respectivamente, con diferencias significativas ($p<0.05$) de T3 con T2 y T1, y una alta correlación ($p<0.05$) de acuerdo a Pearson, con la ETi, en los tratamientos T1 y T2, de 0.50 y 0.48, respectivamente. Los valores de Kc no están asociados a un estado fenológico y son cercanos a los reportados por Esmeral (2011), en rosa cv. Charlotte plantado en la sabana de Bogotá, de 0.79 y 1.50, en función del estado fenológico. El Kc de 1.15 del T1, es similar al encontrado por Arévalo (2011), de 1.13, para un tratamiento regado al 100% de la ETc, en rosa cv. Freedom, en suelo.

Los valores medios de Kc del T1 y T2 fueron similares, al igual que el de T3 y el utilizado como valor constante en esta investigación (0.94). Con máximos de 1.34 y 1.25,

respectivamente (Tabla 3.5). T3 que obtuvo un Kc menor al de T1 y T2, presentó un máximo de 1.07.

Tabla 3-5 Evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo), del lisímetro (ETi) y coeficiente de cultivo calculado (Kc). Valores con la misma letra indican que no se presentaron diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05).

Semana	ETo (mm/ semana)	T1 (100%ETc)		T2 (80%T1)		T3 (65%T1)	
		ETi (mm/ semana)	Kc	ETi (mm/ semana)	Kc	ETi (mm/ semana)	Kc
35	1.30	1.59a	1.17a	1.42a	1.01a	1.14a	0.80a
36	1.79	1.66a	0.95a	1.82a	0.99a	1.61a	0.90a
37	1.41	1.53a	1.14a	1.64a	1.17a	1.35a	0.99a
38	1.60	1.85a	1.18a	1.84a	1.17a	1.55a	0.99a
39	1.83	2.47a	1.34a	2.27a	1.24ab	1.96a	1.07b
40	1.64	1.98a	1.32a	1.77a	1.18a	1.44a	0.96a
41	1.50	1.66a	1.01a	1.62a	1.01a	1.26a	0.78b
42	1.84	2.27a	1.20a	2.13a	1.14a	1.76a	0.95a
43	1.75	1.90a	1.11a	2.04a	1.18a	1.71a	0.97a
44	1.73	2.18a	1.13a	2.33a	1.25a	1.83a	0.99a
45	2.43	2.19a	1.04a	2.00a	0.97a	2.11a	0.93a
46	2.07	2.26a	1.20a	2.11a	1.13ab	1.65a	0.88b
47	2.33	2.70ab	1.21a	2.62a	1.14ab	2.01b	0.78b
48	2.25	2.41a	1.18a	2.30ab	1.13a	1.82b	0.94a

3.6 Condición hídrica del sustrato

3.6.1 Potencial matricial del sustrato (Ψs)

El potencial matricial del sustrato (Ψs) fue creciente durante el experimento en todos los tratamientos, medido a las 7:30 a.m., 10:30 a.m. y 13:30 p.m. Los cuales variaron entre -0.10 y -6.00 cbar.

En T2 y T3 se encontraron en el rango de agua fácilmente disponible (-1 a -5 cbar), contrario a T1 durante las dos primeras horas de medición, donde el Ψs se encontró por debajo de -1cbar (Tabla 3-6), pero en el intervalo de agua total disponible (0 a -10 cbar).

Tabla 3-6 Potencial matricial del sustrato (Ψs).

Hora Ψs / media	Ψs (cbar) -7:30 a.m.	Ψs (cbar) -10:30 a.m.	Ψs (cbar) -13:30 p.m.
T1 (100%ETc)	-0.17	-0.72	-1.28
T2 (80%T1)	-1.34	-1.90	-2.36
T3 (65%T1)	-2.29	-2.87	-3.59

La tensión matricial del sustrato se comportó de acuerdo al grado de humedad del mismo, con los más negativos en T3, y los más cercanos a cero en T1.

3.7 Condición hídrica de la planta

3.7.1 Potencial hídrico al tallo (Ψt)

El Ψt vario en función del nivel de agua de cada tratamiento, encontrando que en nueve de las catorce semanas se presentó diferencias significativas ($p<0.05$), 35 y 36, el tratamiento T1 fue menor respecto a T2 y T3, diferente a las semanas 40 y 46, donde el T3 tuvo valores inferiores de T1 y T2 (Figura 3-8).

El T3 al que se le aplico la menor lámina de agua, presentó el más bajo Ψt (-0.98 MPa) y el T2 el más alto (-0.20 MPa), coincidiendo con el menor DPV (0.0006 kPa) y la mayor humedad relativa (99.9%) al momento de la medición del Ψt, similares a los reportados por Arévalo (2011), -0.23 a -0.71 Mpa en rosa cv. Freedom, y mayores a los encontrados por Urban L *et al*., (2002) de -1.59 y 1.28 MPa, en rosa cv. First Red y Twingo, respectivamente. (Ackerson, 1985) observó que para causar un descenso en la apertura estomática, en distintas especies ornamentales, los valores de Ψt deben oscilar entre -0.7 y -1.2 MPa, lo que quiere decir que con los valores medios obtenidos de -0.67, -0.58 y -0.61 MPa en T1, T2 y T3, respectivamente, con diferencias significativas ($p<0.05$) de T1 con T2, no se presentó una disminución generalizada de la conductancia estomática. Van Doorn y Vojinovic (2002), encontraron problemas de abscisión de pétalos en florero para rosa

variedades Sonia, Frisco y Cara mia, cuando el potencial hídrico de la hoja alcanzaba valores inferiores a -2.0 MPa. Dixon *et al.* (1988), reportaron con un Ψt cercano a -4.0 MPa una pérdida total en la capacidad de conducción de agua (cavitación del xilema), en Rosa *hybrida* Samantha, muy por debajo de los valores encontrados en esta investigación.

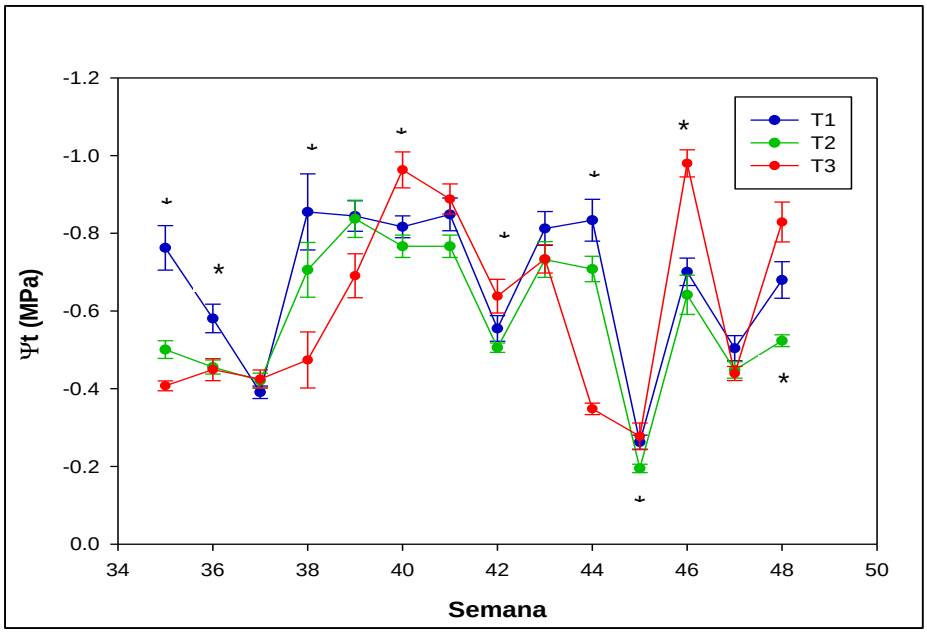

Figura 3-8 Potencial hídrico al tallo en los tratamientos de riego. El * indica diferencia significativa de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05).

La Figura 3-9 muestra la relación entre el Ψt y el déficit de presión de vapor (DPV), en la semana 45 se presentaron los mayores Ψt (MPa), y los menores DPV (kPa) en todos los tratamientos. Lo que ratifica que la temperatura del aire y la humedad relativa inciden en la tensión a la que se encuentra sometida el agua dentro de la planta. La disminución del DPV al interior del invernadero mejora el estado hídrico de la planta, manifestado en una menor transpiración, un incremento en el potencial hídrico y una mayor tasa de expansión de las hojas (Liu *et al.* 2006).

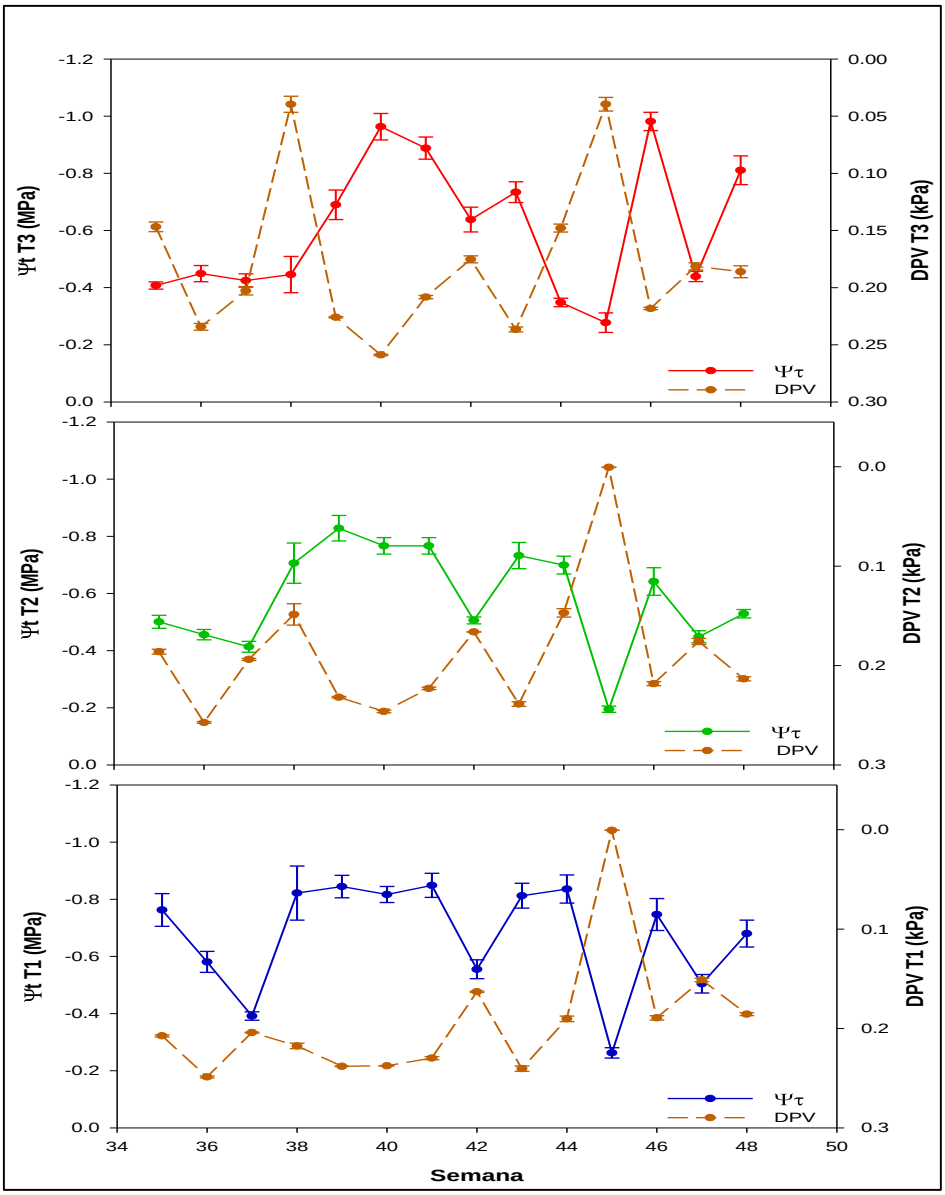

Figura 3-9 Fluctuación del potencial hídrico al tallo (Ψt) y el déficit de presión de vapor (DPV).

Al realizar la matriz de correlación de Pearson entre Ψt, DPV y área foliar, existe significancia ($p<0.01$) en todos los tratamientos, entre el Ψt y el DPV (Tablas 3-7, 3-8 y 3-

9). En el T1 existe significancia ($p<0.05$) entre el área foliar y el DPV, en los demás tratamientos no se evidencia correlación alguna entre el área foliar con el DPV y el Ψt.

Tabla 3-7 Matriz de correlación de Pearson para T1, entre las variables de potencial hídrico al tallo (Ψt), déficit de presión de vapor (DPV) y área foliar.

Correlaciones			
	Ψt (MPa)	DPV (kPa)	Área Foliar (cm²)
Ψt	1		
DPV	-0.776**	1	
Área Foliar	0.332	-0.491*	1

**La correlación es significativa al nivel 0.01 (unilateral)

*La correlación es significativa al nivel 0.05 (unilateral)

Tabla 3-8 Matriz de correlación de Pearson para T2, entre las variables de potencial hídrico al tallo (Ψt), déficit de presión de vapor (DPV) y área foliar.

Correlaciones			
	Ψt (MPa)	DPV (kPa)	Área Foliar (cm²)
Ψt	1		
DPV	-0.812**	1	
Área Foliar	0.230	-0.221	1

**La correlación es significativa al nivel 0.01 (unilateral)

Tabla 3-9 Matriz de correlación de Pearson para T3, entre las variables de potencial hídrico al tallo (Ψt), déficit de presión de vapor (DPV) y área foliar.

Correlaciones			
	Ψt (MPa)	DPV (kPa)	Área Foliar (cm²)
Ψt	1		
DPV	-0.707**	1	
Área Foliar	0.248	-0.267	1

**La correlación es significativa al nivel 0.01 (unilateral)

3.7.2 Curva presión volumen

Las curvas Presión-Volumen de cada tratamiento, las ecuaciones de ajuste de una Hyperbola Modificada II, y el coeficiente de determinación (R^2) 0.87, 0.85 y 0.84 para T1, T2 y T3 con significancia del 5%, respectivamente, se muestran en la Figura 3-10. Comportamiento similar a las reportadas por (Díaz *et al.,* 2016; Villaseñor-López *et al.,* 2012; Polanía *et al.,* 2003). Inicialmente, con las hojas saturadas, el contenido relativo de agua fue elevado, indicando un potencial hídrico alto, esto debido a que las células se encontraban hidratadas y por consiguiente con una concentración de solutos baja. A medida que la hoja perdía agua, el potencial hídrico disminuía, con tendencia logarítmica o exponencial (Polanía *et al.,* 2003).

.

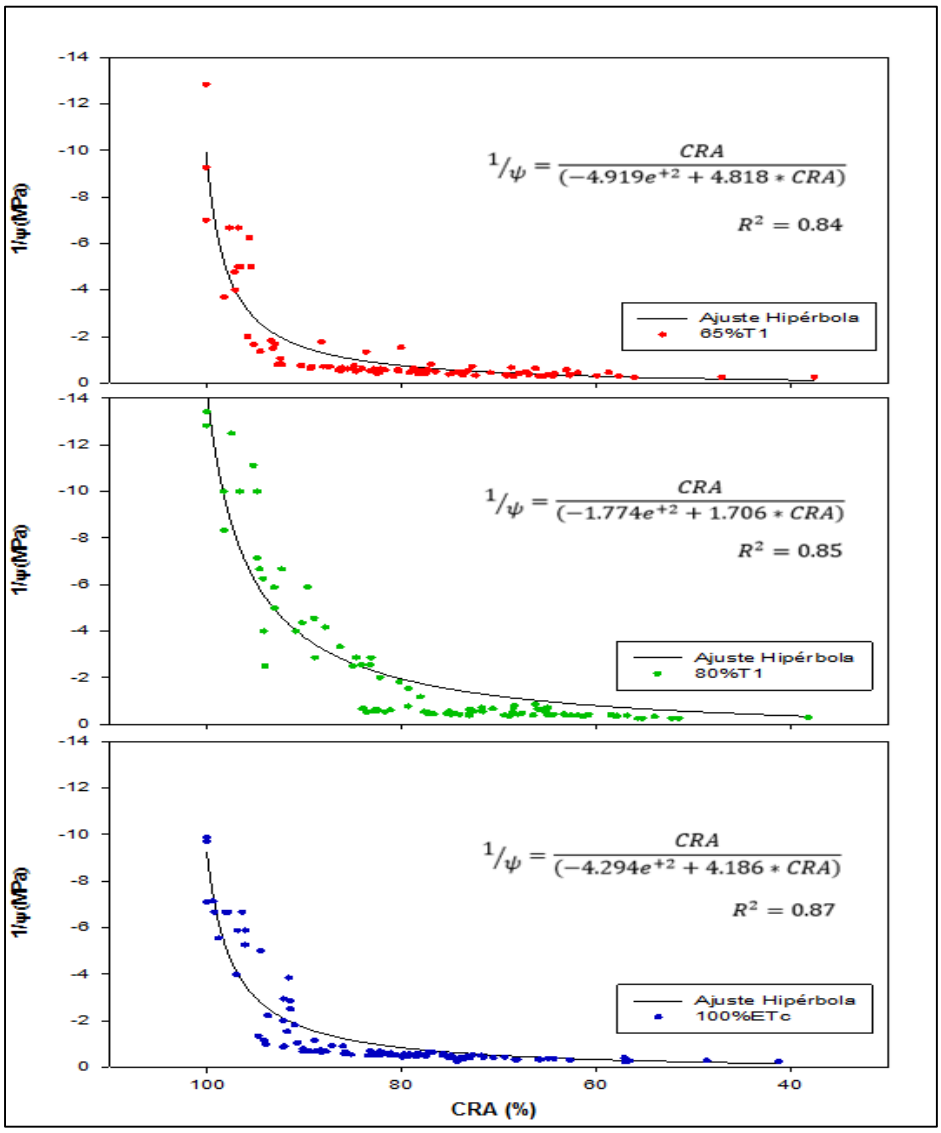

Figura 3-10 Curva presión- volumen y ecuación de ajuste por tratamientos de riego.

Mediante las curvas se pudo determinar el estado hídrico de las hojas, el contenido hídrico foliar (CHf), contenido relativo de agua en el punto de perdida de turgencia (CRAppt), el contenido relativo de agua apoplástica (CRAa), potencial osmótico saturado (Ψos) y potencial en el punto de pérdida de turgencia (Ψoppt), y elasticidad máxima (Ɛmax).

El potencial osmótico saturado (Ψos), el del punto de pérdida de turgencia (Ψoppt), la elasticidad máxima (Ɛmax) y el contenido relativo de agua en el punto de perdida de turgencia (CRAppt), no presentaron diferencias significativas ($p<0.05$) entre tratamientos, debido a que la planta no realizó ajuste osmótico como mecanismo de tolerancia ante condiciones de estrés hídrico, ni un ajuste elástico, respectivamente (Tabla 3-10). Álvares *et al.,* (2009) reportaron que en clavel sembrado en turba, sometido a tres tratamientos de riego: un control (T0=100%ETc), T1 equivalente a 70%T0 (riego deficitario moderado), y T3 equivalente a 35%T0 (riego deficitario severo), se presentó ajuste osmótico en el tratamiento más deficitario, y ajuste elástico en los dos tratamientos deficitarios -2,337, -2,413 y -2,915 MPa de Ψoppt y 4.89, 9.17 y 8.55 MPa de Ɛmax para T0, T1 y T2, respectivamente. Valores menores y mayores, respectivamente a los encontrados en este estudio.

Tabla 4-10 Parámetros obtenidos a partir de la curva presión-volumen: Contenido hídrico foliar (CHf), potencial osmótico saturado (Ψos), contenido relativo de agua en el punto de perdida de turgencia (CRAppt), contenido relativo de agua apoplástica (CRAa), potencial osmótico en el punto de pérdida de turgencia (Ψoppt) y elasticidad máxima (Ɛmax). Letras diferentes indican diferencias significativas (p<0,05), según prueba de Duncan.

Parámetro	T1 (100%ETc)	T2(80%T1)	T3(65%T1)
CHf (%)	73.784a	74.234a	72.482a
Ψos(MPa)	-0.556a	-0.524a	-0.635a
CRAppt (%)	74.479a	71.918a	74.193a
CRAa (%)	55.820a	50.639a	54.653a
Ψoppt (Mpa)	-1.567a	-1.420a	-1.672a
$Ɛ_{max}$, Mpa	3.701a	3.412a	4.047a

3.8 Parámetros de crecimiento

3.8.1 Área foliar (AF)

Al final del experimento se obtuvo áreas foliares de 11.73, 11.65 y 11.21 cm^2 en el T1, T2 y T3, respectivamente, sin diferencias significativas ($p<0.05$). Se ve como de la semana 35 a la 37, y de la 39 a la 47, el T2 presentó los valores mal altos, y el T1 con la mayor aplicación de agua mostró los más bajos en la semana 37, esto puede atribuirse al tiempo que tiene la planta para asimilar el cambio inducido por los tratamientos, bajo las condiciones del estudio. Contrario a lo sucedido entre las semanas 39 y 47 en el tratamiento de menor lámina de agua con las áreas más bajas (Figura 3-11).

Al no presentarse un descenso general en la apertura estomática en las condiciones hídricas de la planta, se puede afirmar que estas no mostraron un comportamiento adaptativo como lo es la reducción del área foliar. Álvarez (2011), encontró que en plantas de clavel, geranio y callistemon sometidas a dos regímenes de déficit hídrico, presentaron valores menores de AF respecto a un tratamiento control bien regado.

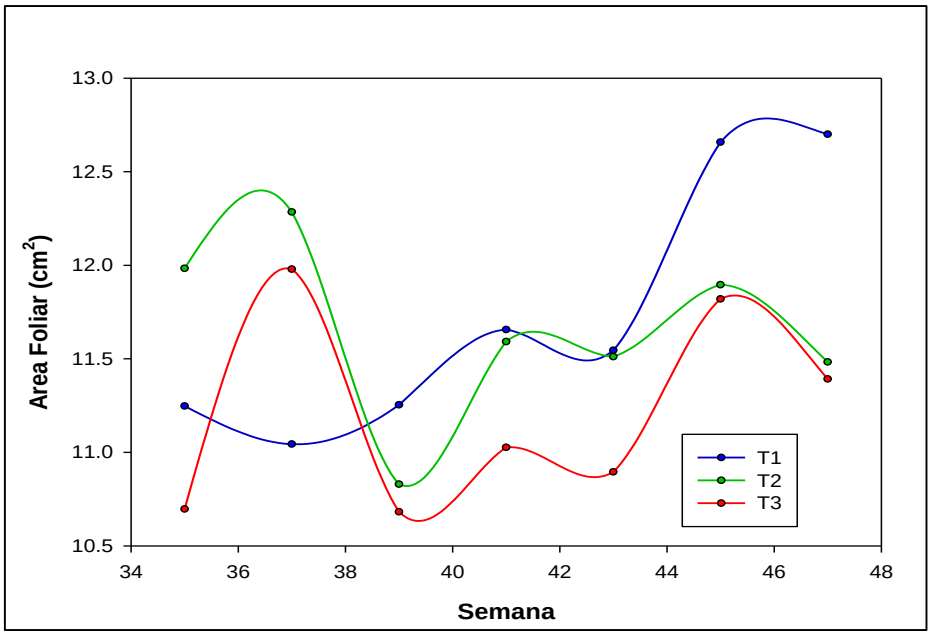

Figura 3-11 Área foliar en los tratamientos de riego.

3.8.2 Crecimiento de tallo y botón

Durante dos periodos consecutivos, semana 35 a 43 y 39 a 47, se realizó el seguimiento del crecimiento del tallo y botón floral, aproximadamente tres semanas y media después del corte, en tallos florales de 4.33 cm de longitud y 3.07 mm de diámetro. La medición del diámetro del botón floral se inició en el estadio fenológico “arroz”. El crecimiento fue continuo, (Figuras 3-12, 3-14, 3-16 y 3-18), obteniendo curvas de tipo sigmoidal simple, con tres fases de crecimiento, logarítmica, lineal y de senescencia, descritas por (Salisbury y Ross, 1992).

Función logística obtenida en el ajuste de las curvas de crecimiento para la longitud del tallo floral (Ecuación 3-1).

$$\boldsymbol{y} = \frac{\boldsymbol{a}}{\mathbf{1} + \boldsymbol{e}^{-\boldsymbol{b}(\boldsymbol{t}-\boldsymbol{c})}} \qquad \text{Ecuación } 3-1$$

Donde:

$\boldsymbol{y}$= dimensión de la variable

$\boldsymbol{a}$ = máxima magnitud de la variable

$\boldsymbol{b}$ = parámetro que determina la pendiente de la curva

$\boldsymbol{c}$ = momento en que se logra la máxima tasa de crecimiento

$\boldsymbol{t}$ = tiempo de crecimiento

El momento del corte de los tallos florales obedeció a los parámetros de comercialización establecidos por la compañía, para el primer ciclo, semana 43, la cosecha fue de 46.4, 65.4 y 67.9% para los tratamientos T1, T2 y T3, respectivamente, el resto de los tallos se cortaron en la semana 44. En el segundo ciclo, semana 47, el número de tallos cosechados disminuyó con respecto a los del primer ciclo, sin embargo se mantuvo la tendencia del tratamiento T3, con el mayor porcentaje, 42.9%, frente al 23.3 y 20.0% del T2 y T1 respectivamente, en la semana 48 se cosecharon los tallos restantes.

- **Longitud y diámetro del tallo floral**

El crecimiento del tallo, correspondió a una curva tipo sigmoidal con las tres fases de crecimiento, *logarítmica,* caracterizada por una lenta velocidad inicial de crecimiento, *lineal,*

donde el aumento progresivo en el crecimiento correspondió a periodos iguales de tiempo, con una pendiente constante, y *senescencia,* en la cual se presentó un crecimiento desacelerado.

Al finalizar el primer periodo, semana 43, al haber acumulado 742 grados dia^{-1}, para T1, T2 y T3 se obtuvo una longitud de tallo de 65.03, 67.27 y 56.92 cm, respectivamente, con diferencias significativas ($p<0.05$) de T3 con T1 y T2 (Figura 3-12A). Las curvas obtenidas se ajustaron al modelo logístico, (Tabla 3-11), reportado por (Flórez *et al.,* 2006). Para el diámetro del tallo floral, (Figura 3-12B), se obtuvo 6.13, 6.20 y 5.52 mm para T1, T2 y T3, con coeficientes de variación (CV) de 12.21, 11.92 y 10.77%, respectivamente, con diferencias significativas ($p<0.05$) del T3 con T1 y T2.

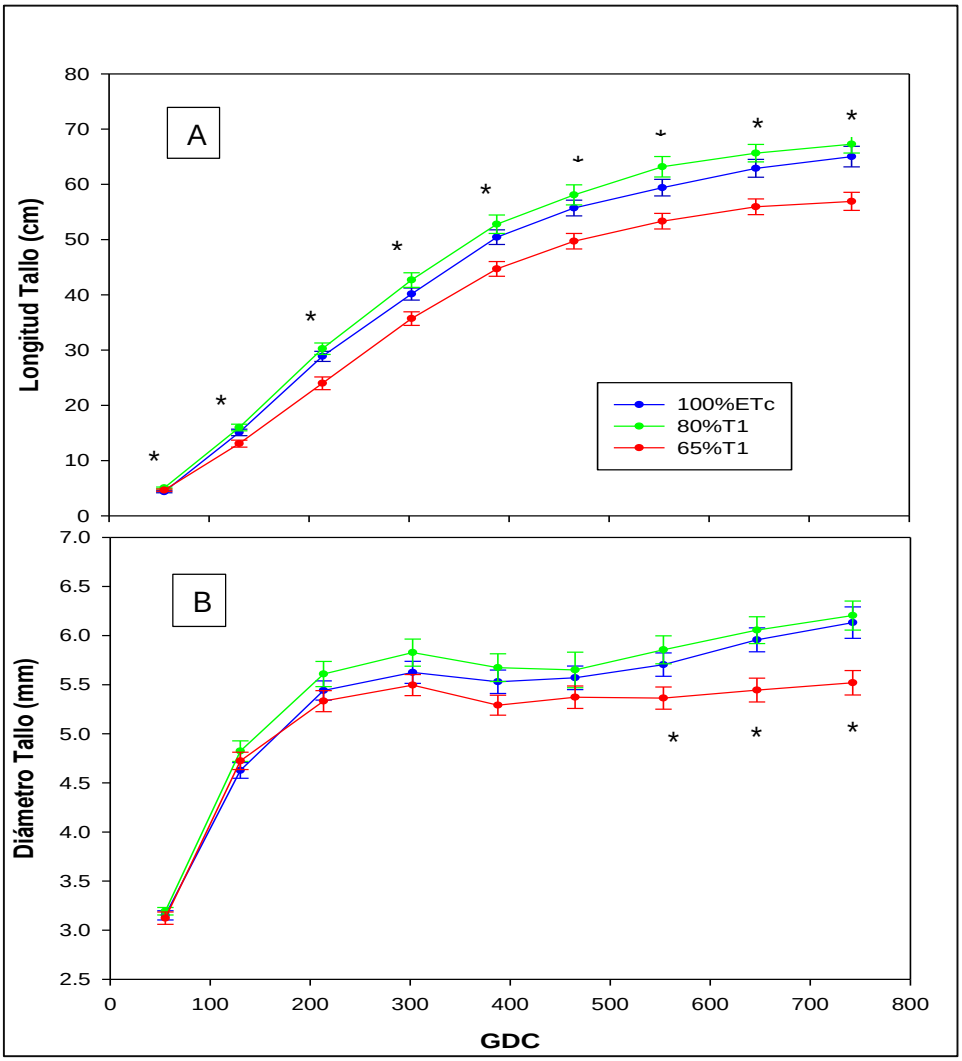

Figura 3-12 Curva de crecimiento del tallo floral, primer ciclo, A) longitud y B) diámetro. El * indica diferencia significativa de acuerdo a la prueba de Duncan ($p<0.05$).

Tabla 3-11 Ecuaciones del modelo logístico para la longitud del tallo; semana 35 a la 43.

Tratamiento	Longitud del tallo floral	
	Modelo	R^2
T1 (100%ETc)	$y = \frac{63.5476}{1 + e^{-1.1732\,(t-37.3751)}}$	0.9940
T2 (80%T1)	$y = \frac{66.2942}{1 + e^{-1.1650\,(t-37.3399)}}$	0.9954
T3 (65%T1)	$y = \frac{56.4526}{1 + e^{-1.1631\,(t-37.4138)}}$	0.9978

De acuerdo con los parámetros hallados en el modelo de ajuste tipo logístico para el crecimiento del tallo floral durante el primer ciclo de medición, el mayor valor que podría presentarse sería 66.29 cm, correspondiente al tratamiento T2.

La tasa absoluta de crecimiento (TAC) en los tres tratamientos mostro una tendencia típica de una campana de Gauss, (Figura 3-13A), con un crecimiento progresivo hasta alcanzar los máximos valores en la semana 37, de 17.76, 18.57 y 15.50 cm para T1, T2 y T3, respectivamente, disminuyendo hasta alcanzar valores cercanos a cero en la fase de senescencia hasta la cosecha. La tasa relativa de crecimiento (TRC) mostró una tendencia de disminución hasta la cosecha, alcanzando valores cercanos a cero (Figura 3-13B).

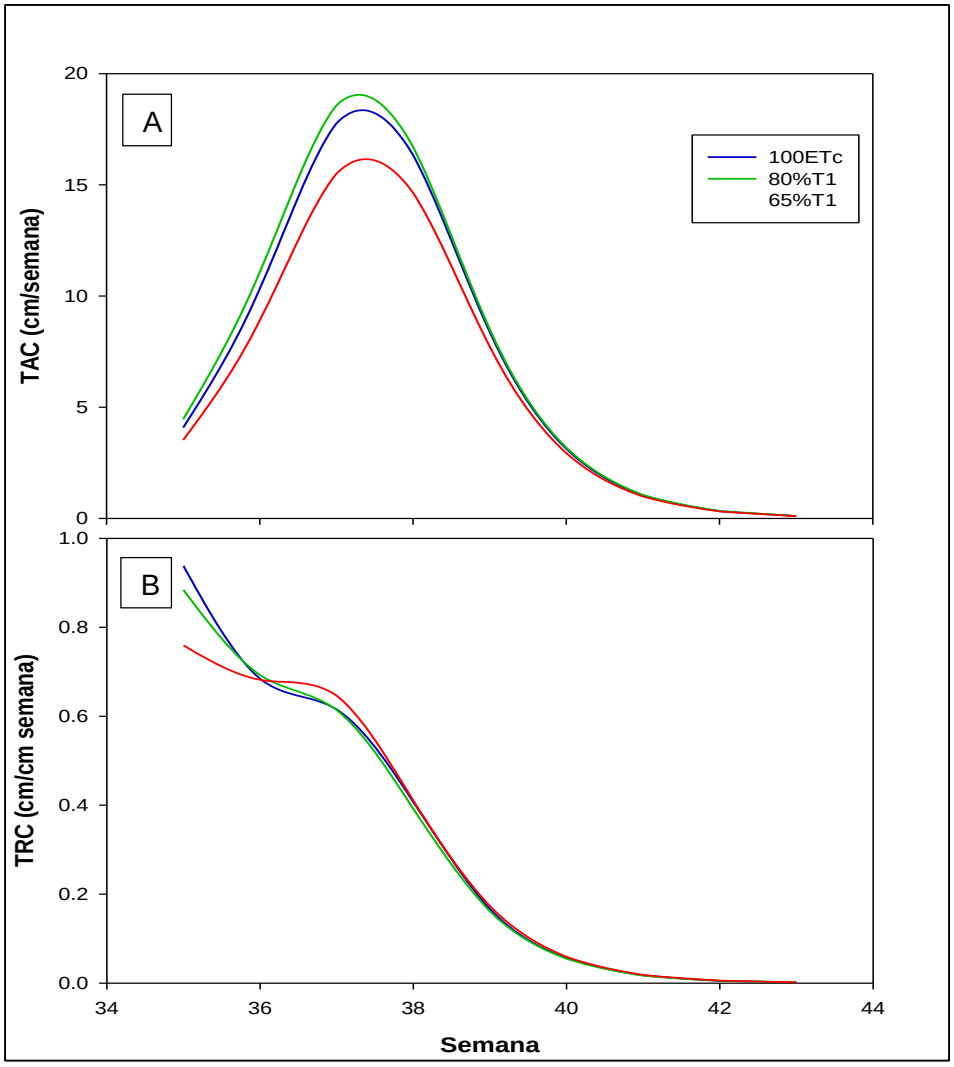

Figura 3-13 Curva de crecimiento del tallo floral, semanas 35 a la 43, A) Tasa absoluta de crecimiento (TAC) y B) Tasa relativa de crecimiento (TRC).

En el segundo periodo, a partir de la semana 43 (377 grados dia^{-1} acumulados), el T1 presentó los mayores valores de longitud de tallo hasta la cosecha, semana 47 (767 grados dia^{-1} acumulados), con 60.37, 55.81 y 55.80 cm en T1, T2 y T3, respectivamente, sin diferencias significativas ($p<0.05$), (Figura 3-14A). Las curvas obtenidas se ajustaron al modelo logístico, (Tabla 3-12), reportado por (Flórez *et al.,* 2006). Para el diámetro del tallo floral, (Figura 3-14B), al final del ciclo, se obtuvo 5.76, 5.94 y 5.49 mm para T1, T2 y T3, con coeficientes de variación (CV) de 14.60, 10.90 y 13.62% respectivamente, sin diferencias significativas ($p<0.05$).

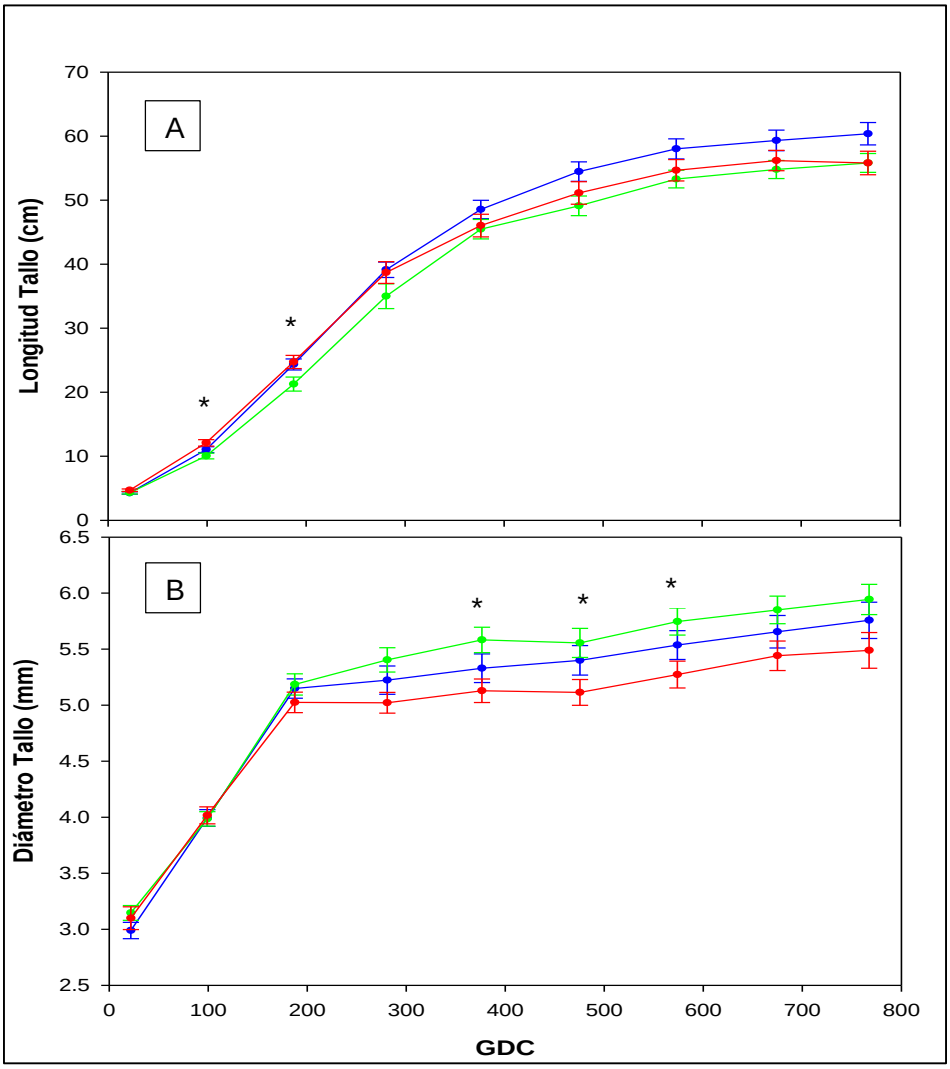

Figura 3-14 Curva de crecimiento del tallo floral, segundo ciclo, A) longitud y B) diámetro. El * indica diferencia significativa de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05).

Tabla 3-12 Ecuaciones del modelo logístico para la longitud del tallo; semana 39 a la 47.

Tratamiento	Longitud del tallo floral	
	Modelo	R^2
T1 (100%ETc)	$y = \frac{59.7375}{1 + e^{-1.0081\,(t-41.4200)}}$	0.9988
T2 (80%T1)	$y = \frac{55.1700}{1 + e^{-1.0211\,(t-41.4796)}}$	0.9985
T3 (65%T1)	$y = \frac{55.8097}{1 + e^{-1.0169\,(t-41.2636)}}$	0.9981

De acuerdo con los parámetros del modelo de ajuste tipo logístico para el crecimiento del tallo durante el segundo ciclo, el mayor valor que podría presentarse sería 59.74 cm, correspondiente al tratamiento T1.

Similar al comportamiento del primer ciclo, la TAC en los tres tratamientos mostro una tendencia típica de una campana de Gauss, (Figura 3-15A), presentando un crecimiento continuo hasta alcanzar los máximos valores en la semana 42, de 13.84, 13.13 y 12.37 cm para T1, T2 y T3, respectivamente, disminuyendo hasta alcanzar valores cercanos a cero en la fase de senescencia hasta la cosecha. La TRC del T2 mostró un comportamiento diferente entre la semana 39 y 40, luego todos los tratamientos presentaron una tendencia similar hasta la cosecha, alcanzando valores cercanos a cero (Figura 3-15B).

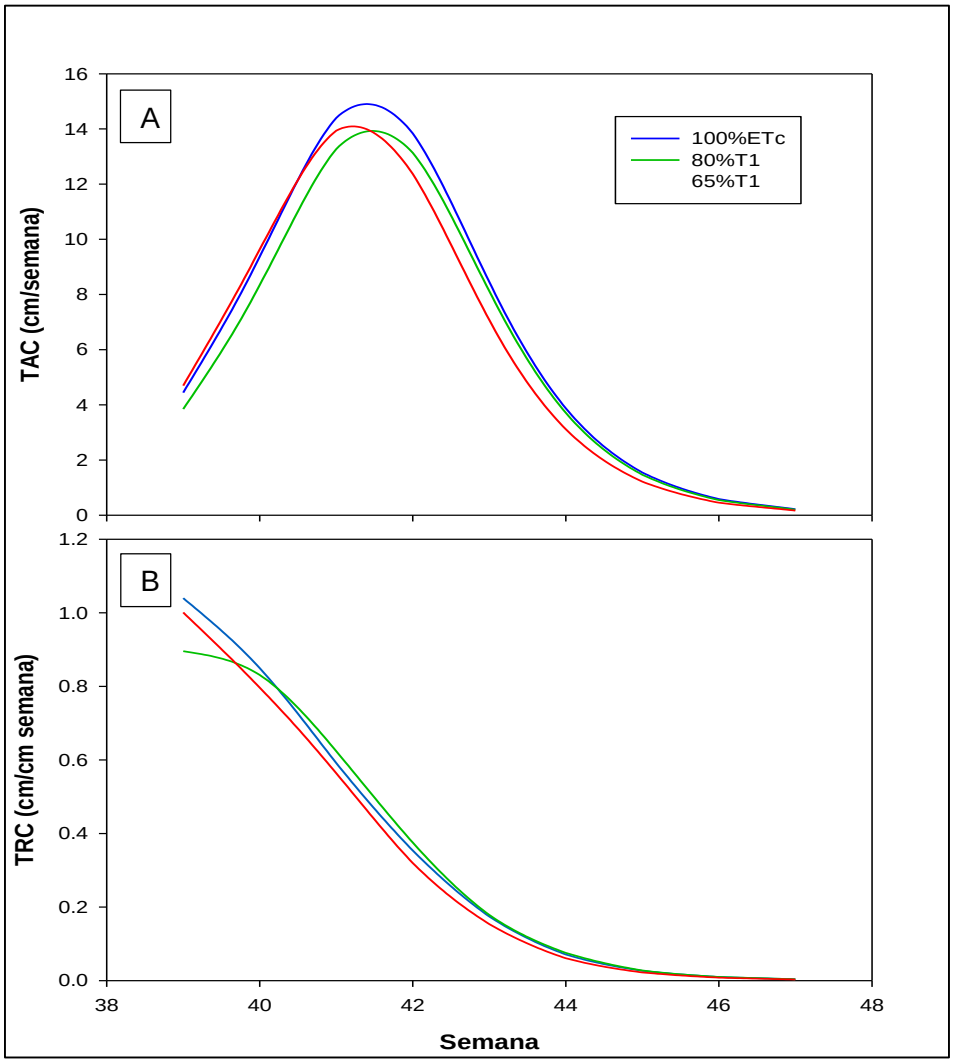

Figura 3-15 Curva de crecimiento del tallo floral, semanas 39 a la 47, A) Tasa absoluta de crecimiento (TAC), B) Tasa relativa de crecimiento (TRC).

No obstante que la longitud del tallo floral medida de los dos ciclos mostró un comportamiento tipo sigmoidal, fue evidente la diferencia de las longitudes al finalizar cada periodo, con valores decrecientes de 4.66, 11.46 y 1.11 cm para T1, T2 y T3, respectivamente, entre el primer ciclo y el segundo, con una disminución considerable en el tratamiento T2 y una diferencia mínima en el T3. El tratamiento con menor aporte hídrico presento una longitud de tallo inferior. De igual manera el crecimiento del diámetro del tallo se redujo entre el primer ciclo y el segundo, 0.37, 0.26 y 0.03 mm en T1, T2 y T3, respectivamente, el tratamiento T3 obtuvo el menor diámetro del tallo floral en los dos ciclos. Lo anterior confirma lo mencionado por Bolla *et al.* (2010), que al tener condiciones

poco favorables de disponibilidad de agua e incluso con pequeñas disminuciones se produce al cese del crecimiento vegetativo.

La interpretación del modelo logístico con base en el crecimiento de un parámetro que tiene gran valor comercial como la longitud del tallo floral, representa una herramienta útil de apoyo para la programación y el manejo agronómico del cultivo comercial de rosa, determinando el momento adecuado para la cosecha, según las requerimientos comerciales.

- **Longitud y diámetro del botón floral**

A partir de la semana 37 se diferenció el botón floral en el estadio fenológico “palmiche o primordio”, en la 38 (302 grados dia^{-1} acumulados) se inició la medición de la longitud para el primer periodo con valores iniciales de 1.26, 1.27 y 1.19 cm para T1, T2 y T3, y CV de 28.35, 23.43 y 23.77%, respectivamente. Al finalizar el periodo en la semana 43 (742 grados dia^{-1} acumulados), se obtuvo una longitud de botón promedio de 4.51, 4.64 y 4.69 cm con CV de 14.48, 12.99 y 10.98% para los tratamientos T1, T2 y T3, respectivamente, sin diferencias significativas ($p<0.05$). Al haber acumulado entre 465 y 553 grados dia^{-1} (Figura 3-16A), se presentó un cese en la elongación del botón, coincidiendo con la mayor HR y el menor DPV (Figura 3-3). Al finalizar el primer periodo, se obtuvo en promedio un diámetro de botón de 23.74, 24.97 y 26.00 mm con CV de 15.63, 11.69 y 11.27% para T1, T2 y T3, respectivamente, sin presentarse diferencias significativas entre tratamientos ($p<0.05$) (Figura 3-16B).

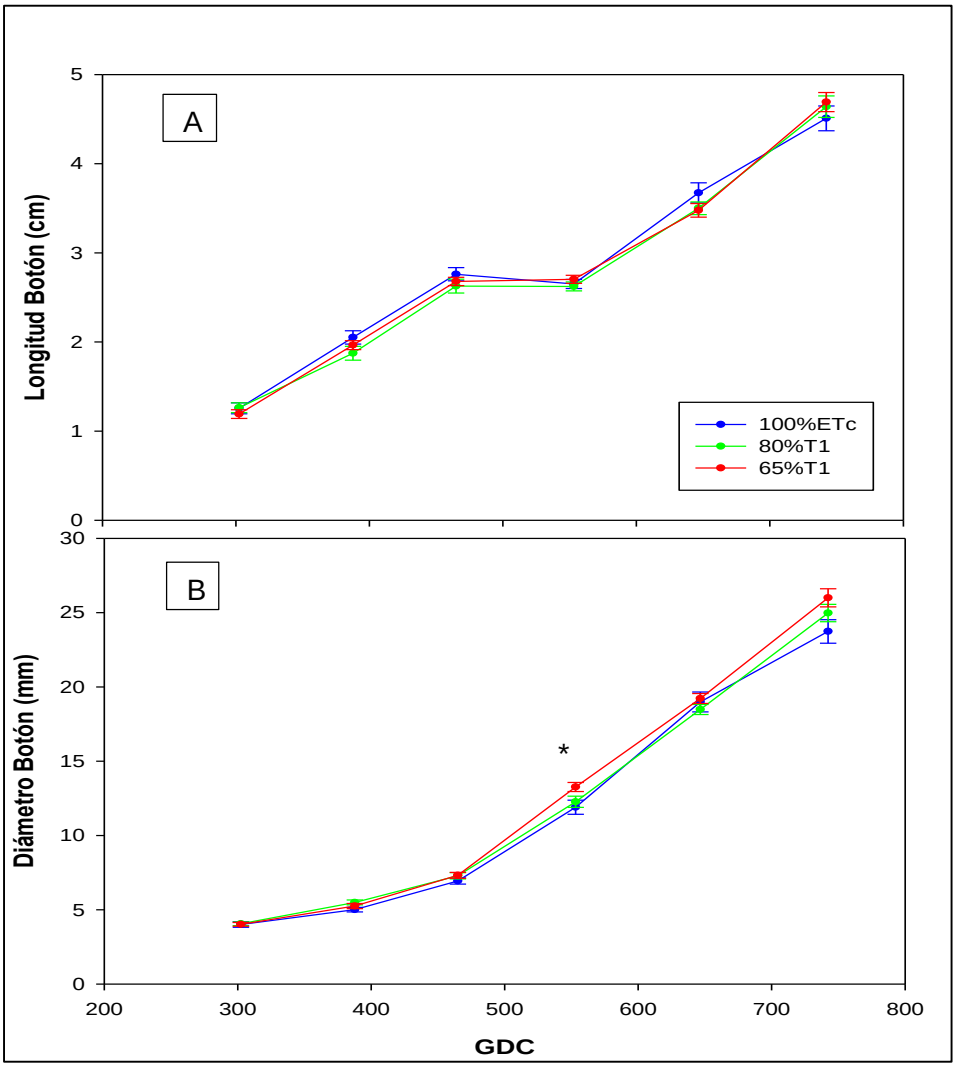

Figura 3-16 Curva de crecimiento del botón, primer ciclo, A) longitud y B) diámetro. El * indica diferencia significativa de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05)

El aumento del diámetro del botón se ajustó a una curva logística de tres parámetros (Ecuación 3-2).

$$\boldsymbol{y} = \frac{\boldsymbol{a}}{\mathbf{1} + \boldsymbol{b}\boldsymbol{e}^{(-\boldsymbol{ct})}} \qquad \text{Ecuación } 3-2$$

Donde:

$\boldsymbol{y}$= dimensión de la variable

$\boldsymbol{a}$ = máxima magnitud de la variable

$\boldsymbol{b}$ = parámetro que determina la pendiente de la curva

c = tasa relativa de crecimiento en el punto de inflexión

t = tiempo de crecimiento

Para el crecimiento del diámetro del botón se compararon el modelo logístico empleado en el crecimiento del tallo floral, y el modelo logístico de la Ecuación 3-2, con mejor ajuste este último, sin embargo para el primer periodo evaluado la TAC en ninguno de los tratamientos presentó el comportamiento típico de la campana de gauss (Figura 3-17A), los máximos valores en los tratamientos teóricamente se alcanzaron en la semana 43. La TRC de T1 a diferencia de T2 y T3 mostro el patrón decreciente continuo (Figura 3-17B).

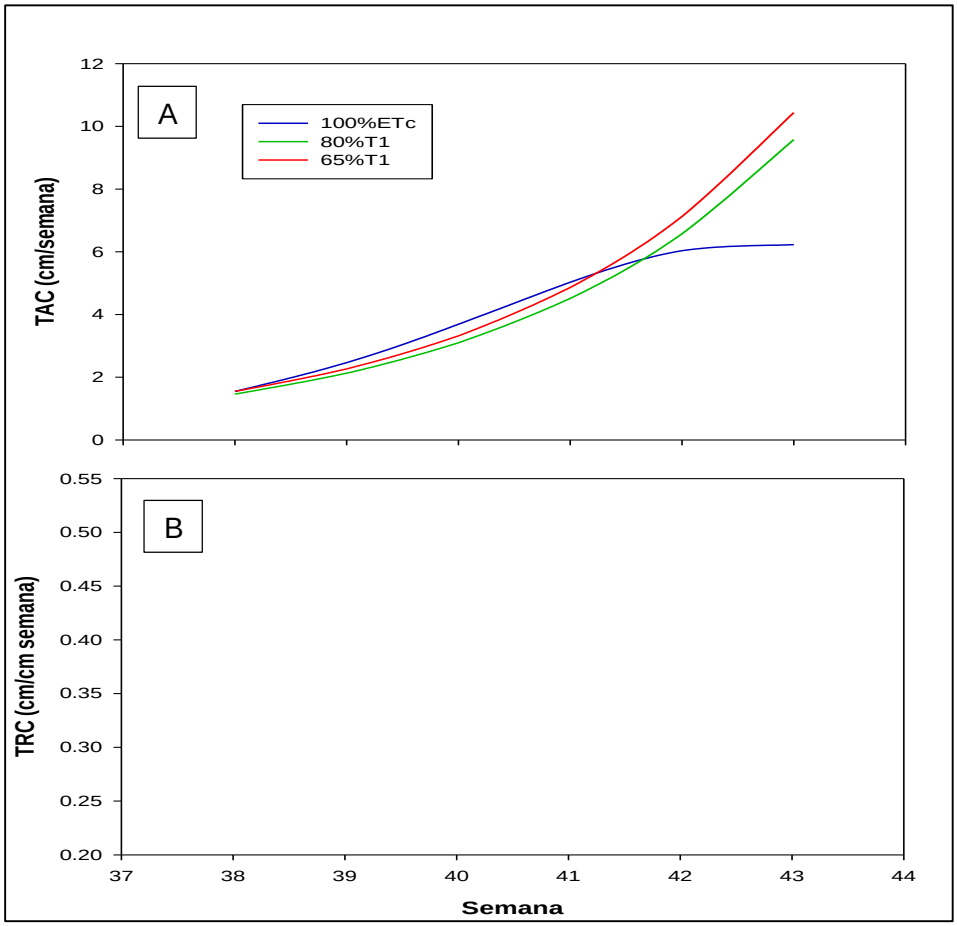

Figura 3-17 Curva de crecimiento del botón, semanas 35 a la 43, A) Tasa absoluta de crecimiento (TAC) y B) Tasa relativa de crecimiento (TRC).

El botón floral presentó los cambios semanales típicos de los estadios fenológicos del tallo floral (Tabla 3-13), coincidiendo el momento en el que se identificó el brote del botón, con el momento máximo de elongación del tallo, semana 37, como lo reporto (De Hoog, 2001). Antes de la diferenciación del botón floral, se presentó el estadio “hojas”, aproximadamente

a los 35 días después de corte (DDC), contando con tres a cinco pares de hojas. La aparición del botón determinó el estadio “palmiche”, 40 DDC, con seis pares de hojas; “arroz”, 45 DDC, con siete a ocho pares de hojas completas; “arveja”, 52 DDC, con pedúnculo de aproximadamente 0.5 cm de longitud, y entre ocho a nueve pares de hojas; “garbanzo”, 62 DDC, pedúnculo promedio de 4 cm de longitud, y aproximadamente trece pares de hojas; “doble garbanzo”, 72 DDC, con pedúnculo aproximadamente de 9 a 12 cm de longitud; “rayar color”, 75 DDC, sépalos sin soltar y “corte”, 85 DDC, sépalos sueltos.

Tabla 3-13 Estadios fenológicos para *Rosa sp.* Vendela, en función del diámetro del botón; semana 38 a 43. Valores con diferente letra indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05).

Semana	Días después del corte (DDC)	Estadios fenológicos	Diámetro del botón (mm)	Diámetro del botón (mm)	Diámetro del botón (mm)
			T1 (100%ETc)	T2 (80%T1)	T3 (65%T1)
38	46	Arroz	4.01a	4.06a	4.02a
39	53	Arveja	5.01a	5.50a	5.25a
40	60	Garbanzo	6.94a	7.29a	7.32a
41	67	Doble garbanzo	11.90a	12.27ab	13.26b
42	74	Rayar color	18.99a	18.48a	19.22a
43	81	Corte	23.74a	24.97a	26.00a

En el segundo periodo, la longitud del botón, fue medida a partir la semana 42 (281 grados dia^{-1} acumulados), con valores iniciales de 0.89, 0.95 y 0.81 cm, para T1, T2 y T3, y CV de 32.46, 28.51 y 34.16%, respectivamente. Al concluir el ciclo en la semana 47, al haber acumulado 767 grados dia^{-1} (Figura 3-18A), se obtuvo una longitud de botón promedio de 4.01, 4.02 y 4.28 cm con CV de 14.08, 12.68 y 12.85% para los tratamientos T1, T2 y T3, respectivamente, sin diferencias significativas ($p<0.05$). Al final del segundo periodo, el diámetro del botón fue de 21.34, 21.96 y 23.26 mm con CV de 19.10, 14.31 y 13.53% para T1, T2 y T3, respectivamente, sin diferencias significativas entre tratamientos ($p<0.05$) (Figura 3-18B).

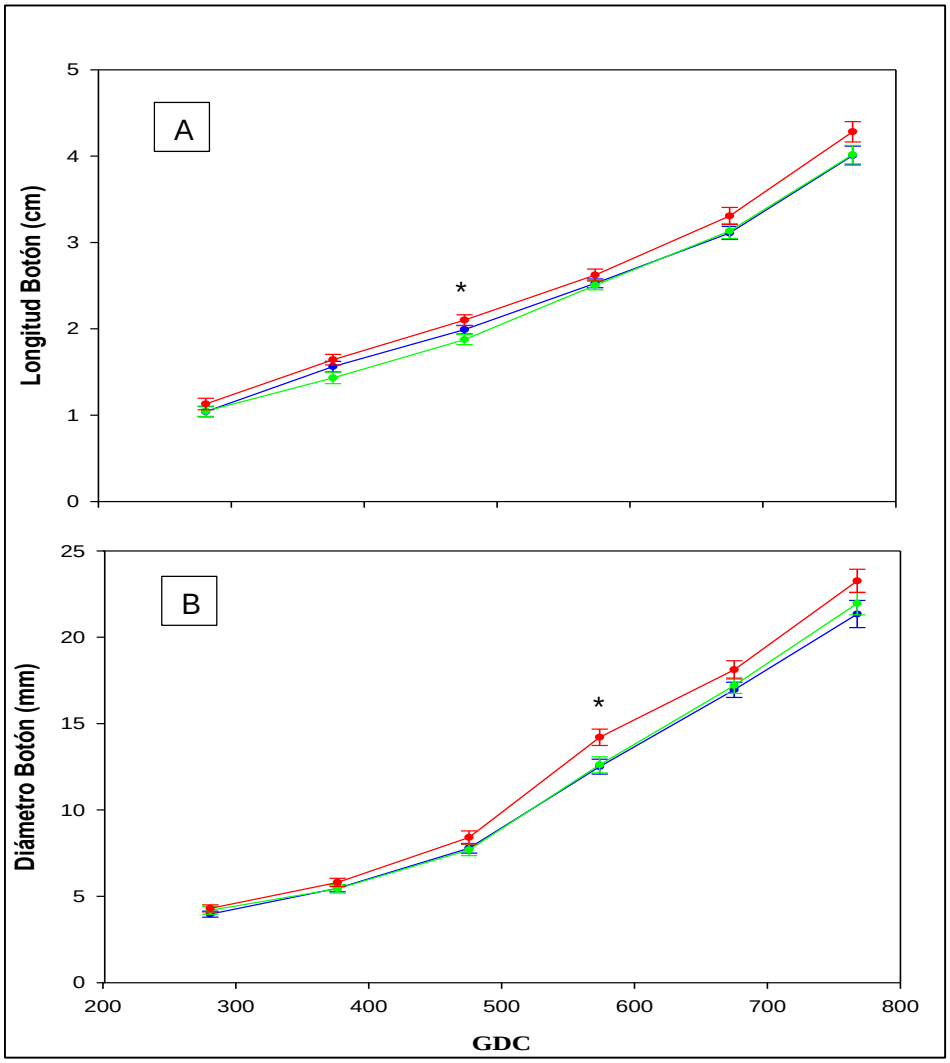

Figura 3-18 Curva de crecimiento del botón, segundo ciclo, A) longitud y B) diámetro. El * indica diferencia significativa de acuerdo a la prueba de Duncan ($p<0.05$).

Igualmente para el diámetro del botón en el segundo ciclo, se comparó el modelo logístico empleado en el crecimiento del tallo floral, y el modelo logístico de la Ecuación 3-2, con mejor ajuste este último. La TAC se incrementó semanalmente hasta alcanzar su punto máximo en la semana 46 en los tratamientos T1 y T2, con valores de 4.71 y 5.04 mm, respectivamente, el máximo valor del T2 se obtuvo en la semana 47 (Figura 3-19A). La TRC presentó una disminución constante en todos los tratamientos, hasta la cosecha en la semana 47 (Figura 3-19B).

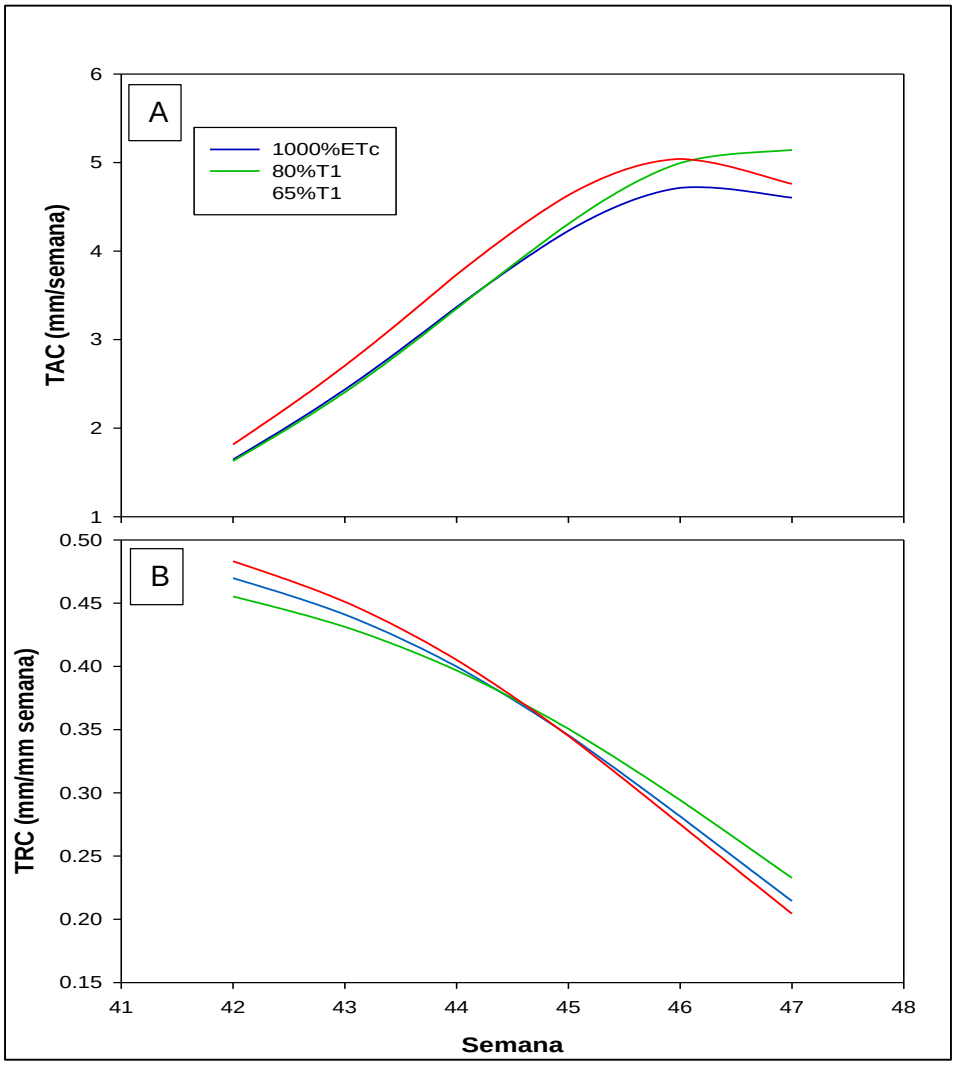

Figura 3-19 Curva de crecimiento del botón, semanas 39 a la 47, A) Tasa absoluta de crecimiento (TAC) y B) Tasa relativa de crecimiento (TRC).

Tabla 3-14 Estadios fenológicos para *Rosa sp.* Vendela, en función del diámetro del botón; semana 42 a 47. Valores con diferente letra indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05).

Semana	Días después del corte (DDC)	Estadios fenológicos	Diámetro del botón (mm)	Diámetro del botón (mm)	Diámetro del botón (mm)
			T1 (100%ETc)	T2 (80%T1)	T3 (65%T1)
42	46	Arroz	3.97a	4.19a	4.30a
43	53	Arveja	5.46	5.44a	5.80a
44	60	Garbanzo	7.78a	7.69a	8.41a
45	67	Doble garbanzo	12.51b	12.61b	14.21a
46	74	Rayar color	16.96a	17.20a	18.11a
47	81	Corte	21.34a	21.96a	23.26a

3.9 Producción de tallos florales

No se presentaron diferencias significativas (p<0.05) en la producción acumulada de tallos florales, con 12.393, 9.779 y 11.197 unidades para T1, T2 y T3, respectivamente.

Se alcanzó una productividad promedio de 1.31, 1.03 y 1.18 tallos planta^{-1} mes^{-1}, para los tratamientos T1, T2 y T3, respectivamente, similares a los reportados por Arévalo (2011), para Rosa cv. Freedom, en suelo, de 1.32, 1.28 y 1.24 tallos planta^{-1} mes^{-1}. Bolla *et al.* (2010), indicó una reducción en la producción de tallos florales comercializables de rosa, cultivada en tres sustratos diferentes, bajo condiciones de déficit hídrico (67% de las necesidades de riego).

El comportamiento de la producción semanal (Figura 3-20), se muestra en dos periodos; el primero de la semana 38 a la 44 los tratamientos T1 y T3 presentan los mayores y menores valores de producción, respectivamente, con diferencias significativas en las semanas 38 (T1 con T3) y 42 (T1 con T2 y T3) y T2 con T3. Y el periodo entre las semanas 45 y 48, con la mayor producción para el T3, y la menor para el T2, con diferencias significativas en las semanas 46 (T3 con T2), 47 (T3 con T1 y T2) y 48 (T3 con T1 y T2) y T1 con T2. El efecto en la producción fue más evidente al final de los tratamientos, donde el T3, incrementó la producción de tallos florales, pero con la mayor cantidad de tallos cortos, similar a lo reportado por Chimonidou (1998), cuando al aplicar diferentes niveles

de restricción hídrica en un cultivo de rosa no presentó diferencias significativas en el número de flores producidas, pero si reducciones en la longitud del tallo floral.

Se determinó el porcentaje de retorno para cada tratamiento, de acuerdo con las proyecciones de la compañía, con un 92.96, 71.62 y 84.64% para T1, T2 y T3, respectivamente, únicamente el T2 estuvo por debajo del 75%, valor de referencia límite de la compañía.

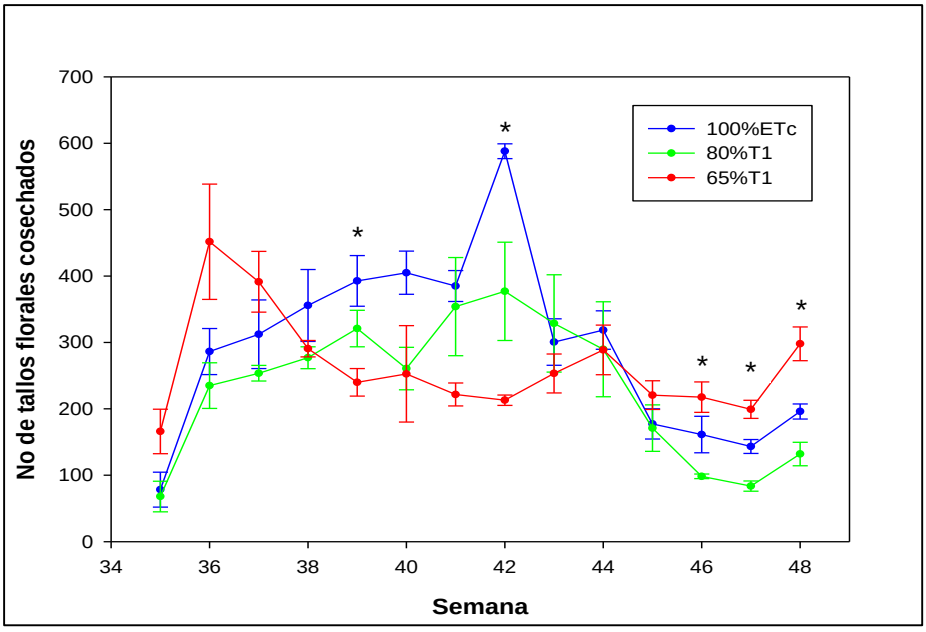

Figura 3-20 Producción semanal de tallos florales en los tratamientos de riego. El * indica diferencia significativa de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05).

3.10 Calidad cosecha

La longitud del tallo es uno de los parámetros de calidad más importantes con fines de exportación. Para la variedad Vendela, cultivada en sustrato, el rango comercial de la compañía es 50 a 60 cm. Al finalizar el periodo de evaluación, semana 48, se obtuvo longitudes de tallo de 56.33, 55.97 y 53.06 cm para T1, T2 y T3, respectivamente, con diferencias significativas ($p<0.05$), de T3 con T2 y T1. Para el diámetro del tallo se obtuvo 5.96, 5.92 y 5.78 mm en T1, T2 y T3, respectivamente, con diferencias significativas ($p<0.05$), de T1 con T3. En la longitud y diámetro del botón no presentaron diferencias significativas ($p<0.05$) (Tabla 3-15).

Tabla 3-15 Longitud y diámetro del tallo y del botón. Valores con letras iguales indican que no hubo diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05).

Parámetro	T1 (100%ETc)	T2 (80%T1)	T3 (65%T1)
Longitud del tallo (cm)	56.33a	55.97a	53.06b
Diámetro del tallo (mm)	5.96a	5.92ab	5.78b
Longitud del botón (cm)	5.11a	5.07a	5.05a
Diámetro del botón (cm)	3.16a	3.13a	3.11a

Lo obtenido en el T3 coincide con lo reportado por Chimonidou (1998), indicando una reducción en la longitud del tallo en Rosa 'Madelon' al aplicar distintos regímenes de riego, basados en diferentes grados de estrés hídrico (leve a moderado). Folegatti *et al.* (2001) reportaron una tendencia lineal decreciente en el diámetro y longitud del tallo y del botón cuando se presentan reducciones en las láminas de riego basadas en fracciones de la evapotranspiración del tanque Clase A (0.25, 0.50, 0.75, 1.00 y 1.25) en plantas de Rosa (Rosa sp.) Cv. Osiana. Según Chimonidou (1999), en rosas la etapa más sensible a la falta de agua es en la iniciación de pétalos y estambres, y cuando se presenta estrés hídrico en esta etapa se reduce la longitud y diámetro del tallo y del botón.

La Figura 3-21 muestra el número de tallos cosechados de acuerdo a las longitudes por tratamiento, de la semana 35 a la 48. El T3 tuvo la mayor cantidad de tallos de menor longitud, 40-55 cm, con el 66% (658 tallos de 995). En T1 y T2 la mayor cantidad se encontraron entre 55-60 cm, 290 y 292, respectivamente. El T3 presentó el menor número de tallos (302) en el rango de 50-55 cm. El tratamiento T1 tuvo el mayor número de tallos en el rango 65 a 80 cm, 106, seguido por T2 con 91, y T3 con 54.

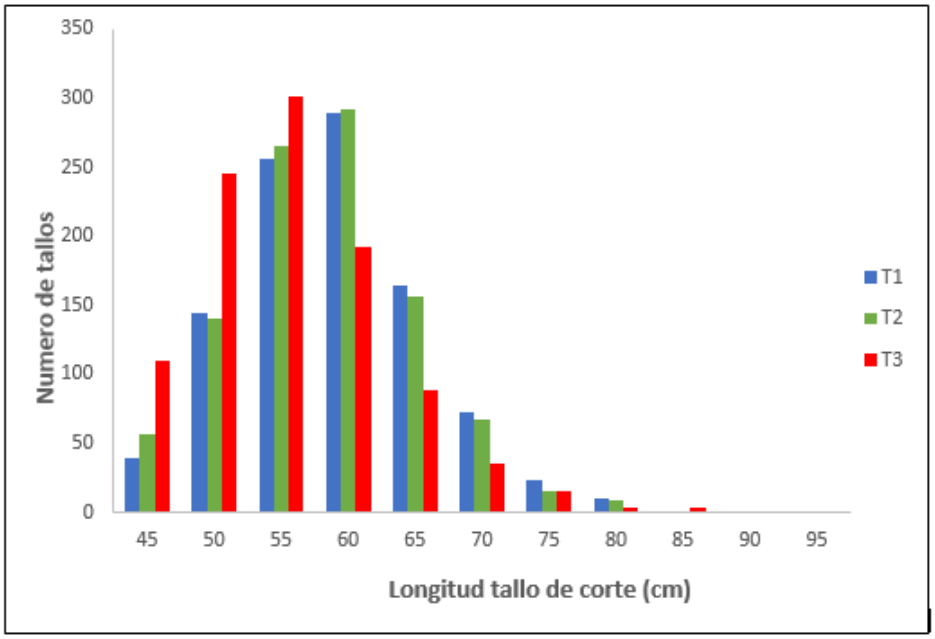

Figura 3-21 Longitud de los tallos florales por tratamiento.

3.11 Eficiencia en el uso del agua (EUA)

Se obtuvo 140.43, 132.00 y 186.61 tallos m^{-3} para T1, T2 y T3, respectivamente, encontrando diferencias significativas ($p<0.05$), del T3 con T2 y T1. Al tratamiento que se le aplicó menor cantidad de agua produjo la mayor cantidad de tallos durante las primeras y últimas cinco semanas (Figura 3-22), confirmando lo reportado por Bolla et al. (2010), de incrementos de la EUA bajo una reducción de la aplicación de agua, coincidiendo con Raviv y Bloom (2001), para un cultivo de rosa cv. Sonia y Laser, donde hubo aumentos de la EUA cuando se redujo la lámina de agua, diferente a lo encontrado en esta investigación en el tratamiento T2, con una producción más baja de tallos florales respecto a la del T1.

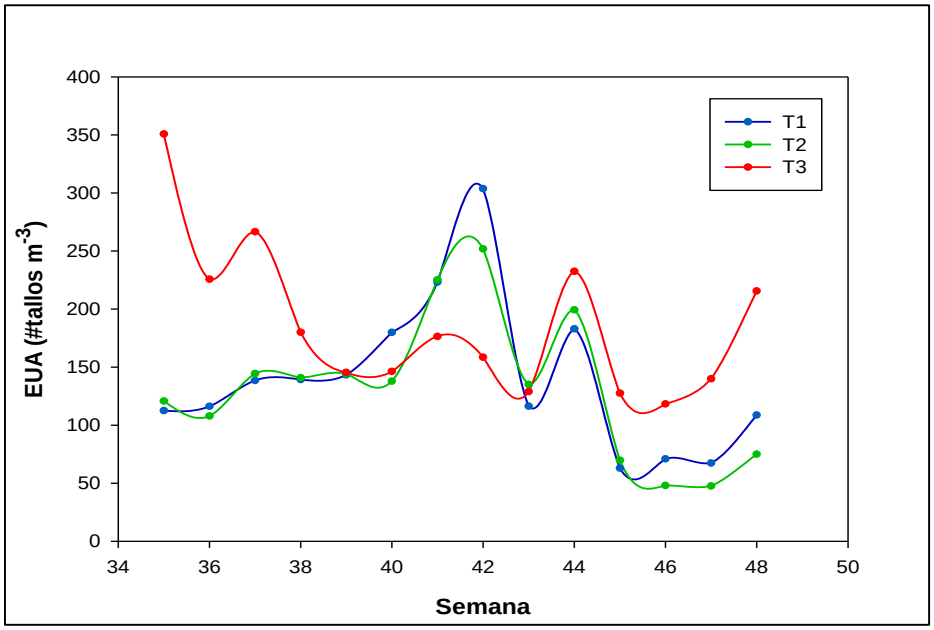

Figura 3-22 Eficiencia en el uso del agua en los tratamientos de riego

3.12 Parámetros de riego

3.12.1 Conductividad Eléctrica (CE)

La CE medida en los tres puntos seleccionados: emisor, sustrato y lixiviado, presentó valores similares entre tratamientos (Tabla 3-16). El valor más elevado de CE (dS/m) se presentó en el drenaje, debido a la mayor concentración de iones disueltos respecto a la del emisor y del sustrato. De igual manera la CE en el sustrato fue mayor a la del emisor, posiblemente por la acumulación de sales en el mismo. La CE en el emisor en los tres tratamientos estuvo en el rango establecido (1.5 a 2.0 dS/m) durante todo el experimento.

Tabla 3-16 CE en emisor, sustrato y lixiviado; semana 35 a 48. Valores con letras iguales indican que no hubo diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Duncan (p<0.05).

CE (dS/m)	T1 (100%ETc)	T2 (80%T1)	T3 (65%T1)
Emisor	1.60a	1.59a	1.58a
Sustrato	1.82a	1.82a	1.82a
Lixiviado	2.03a	2.02a	2.01a

En la Figura 3-23, se observa el comportamiento fluctuante de la CE en el emisor, sustrato y lixiviado, sin diferencias significativas entre tratamientos (p<0.05).

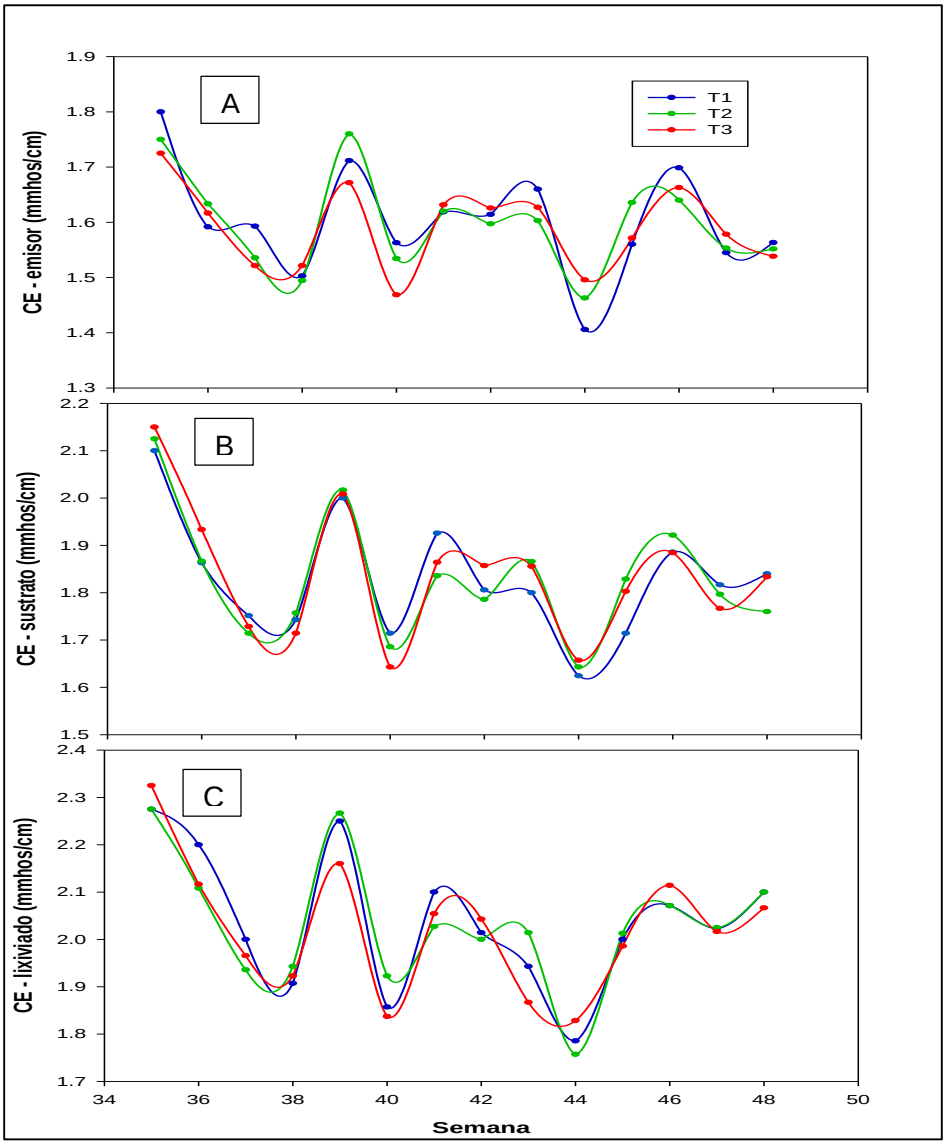

Figura 3-23 Comportamiento de la conductividad eléctrica (CE) en A) emisor, B) sustrato y C) lixiviado.

3.12.2 pH

El pH medido en el emisor, sustrato y lixiviado no presentó diferencias significativas (p<0.05) entre tratamientos. El pH en el emisor fue menor al del sustrato y lixiviado, y el del lixiviado mayor al del sustrato (Tabla 3-17), similar a lo reportado por Petitt (2011). El

pH en los tratamientos estuvo en el rango normal (4.5 a 7.0) para el desarrollo y crecimiento de la rosa (Arévalo, 2011), y los establecidos por la compañía (5.5 a 6.0) para el emisor.

Tabla 3-17 pH en emisor, sustrato y lixiviado; semana 35 a 48.

pH	T1 (100%ETc)	T2 (80%T1)	T3 (65%T1)
Emisor	5.98a	5.98a	6.01a
Sustrato	6.44a	6.48a	6.46a
Lixiviado	6.76a	6.78a	6.78a

En la Figura 3-24 se puede observar el comportamiento del pH en el emisor, sustrato y lixiviado.

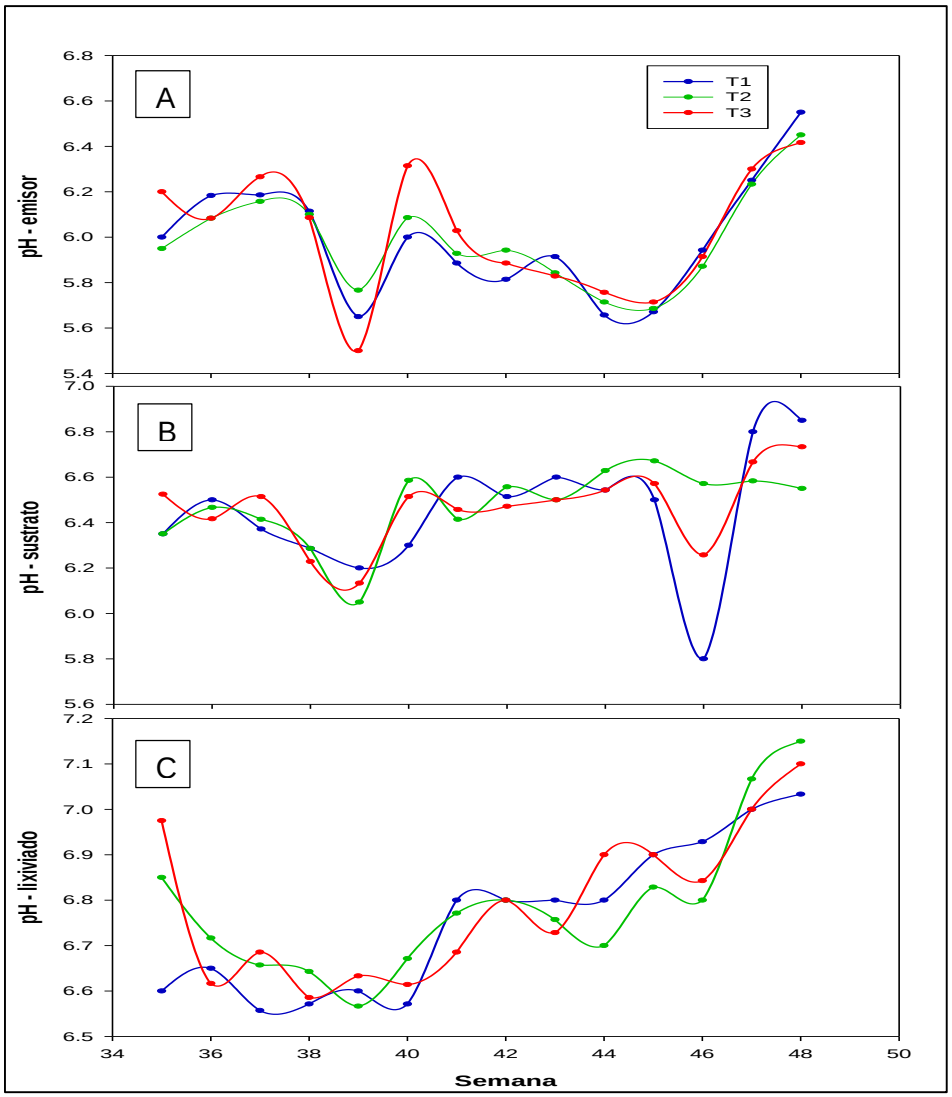

Figura 3-24 Comportamiento del pH en A) emisor, B) sustrato y C) lixiviado.

3.12.3 Contenido de nitratos (N-NO3)

El contenido de Nitrógeno, en forma Nítrica (N-NO3) medido en el emisor, sustrato y lixiviado no presentó diferencias significativas ($p<0.05$) entre tratamientos (Tabla 3-18). El N- en el emisor fue menor al del sustrato y al del lixiviado, respectivamente. El N-NO3 en el emisor y sustrato, en los tratamientos, no presentó niveles tóxicos para el normal desarrollo de las plantas.

Tabla 3-18 N-NO3 en emisor, sustrato y lixiviados; semana 35 a 48.

N-NO3 (ppm)	T1 (100%Etc)	T2 (80%T1)	T3 (65%T1)
Emisor	110.24a	109.76a	109.54a
Sustrato	128.27a	128.23a	132.97a
Lixiviado	148.67a	152.42a	154.97a

La Figura 3-25 muestra el comportamiento del N-NO3 (ppm) en el emisor, sustrato y lixiviado.

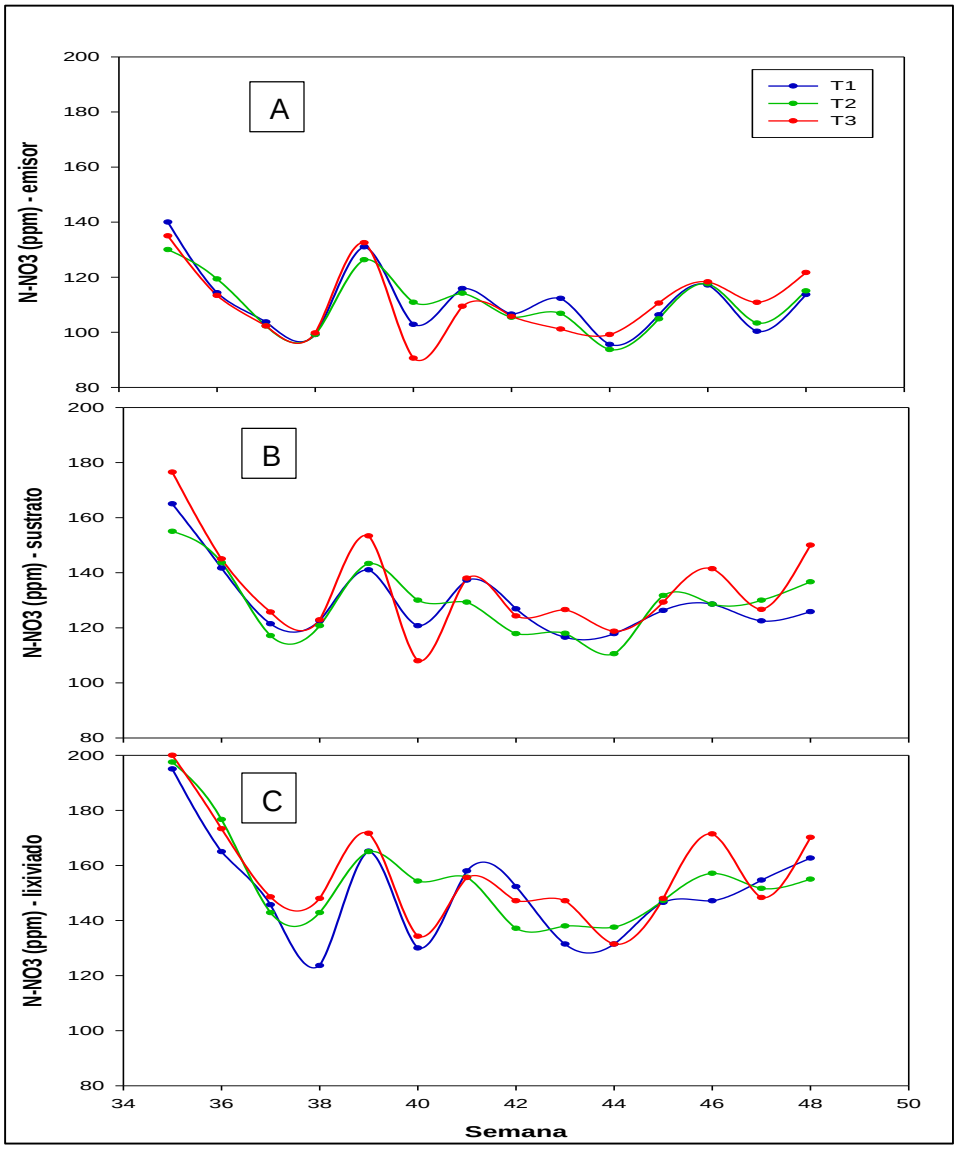

Figura 3-25 Comportamiento de nitratos (N-NO3) en A) emisor, B) sustrato y C) lixiviado.

3.13 Incidencia de plagas y enfermedades

Las plagas y enfermedades con mayor incidencia fueron los ácaros, mildiu velloso y polvoso. El nivel de afectación de ácaros en todos los tratamientos se concentró en el tercio uno, disminuyendo en el dos y el tres. En el tercio uno y dos no se presentó diferencia en el nivel de afectación entre los tratamientos, mientras que en el tercio tres a pesar de la baja ocurrencia, el tratamiento T2 mostró una mayor incidencia. A pesar de contar con un considerable número de cuadros afectados por ácaros en el tercio uno y dos, no se

presentaron pérdidas de tallos florales, puesto que el nivel crítico, tercio tres, mostro una baja cantidad de cuadros afectados.

La mayor incidencia de velloso se dio en grado uno, disminuyendo considerablemente en dos y tres hasta la semana 44, en las semanas 45 y 46 aumento el número de cuadros afectados, en los tratamientos T2 y T3. Mediante los planes de manejo y control se disminuyó el número de cuadros afectados en grado dos y tres, sin pérdidas de tallos florales.

A diferencia del mildiu velloso y ácaros, el mildiu polvoso presentó una baja incidencia respecto al número de cuadros comprometidos, pero con la mayor afectación en el tercio uno y dos. Para el T1, en el tercio dos, el número de cuadros afectados fue el mismo que en el tercio uno. Para el T2, la mayor incidencia se presentó en el tercio dos. El tratamiento T3 solo mostró cuadros afectados en el tercio uno. En el tercio tres durante las primeras semanas de medición no hubo polvoso en ningún tratamiento, a partir de la semana 41 se registraron algunos cuadros afectados en T1 y T2, sin generar pérdidas de tallos.

4. Conclusiones

-El modelo que mejor se ajustó en el proceso de optimización de las curvas de retención de humedad fue el de Van Genuchten con $m = 1 - 2/n$.

-La acumulación grados día permitió verificar la funcionalidad de la temperatura en el crecimiento y desarrollo de la rosa, y es útil en la planificación y predicción del cultivo, en función del tiempo.

-Los volúmenes de riego aplicados a partir de la Evapotranspiración potencial (ETo) y del porcentaje de drenaje (%D) no afectaron el estado hídrico de las plantas.

-Los valores de coeficiente de cultivo calculado (Kc) determinados a partir del balance hídrico, son cercanos a los reportados para otras variedades de rosa cultivadas bajo invernadero en la Sabana de Bogotá.

-El crecimiento del tallo floral se ajustó al modelo logístico, presentando el comportamiento característico sigmoidal que permite la programación del cultivo.

-La curva presión-volumen fue una buena metodología para estudiar los mecanismos de tolerancia del cultivo al estrés hídrico. Se observó que en plantas de Rosa sp variedad Vendela, no hubo ajuste osmótico ni ajuste elástico en los tratamientos que se redujo la lámina de riego, con contenido hídrico foliar similar en los tres tratamientos.

-Reducciones del 35% en la lámina de agua afectó el crecimiento de los tallos pero no el del botón, el área foliar y la producción acumulada de tallos florales, aunque con mayor cantidad de tallos cortos. La eficiencia en el uso del agua (EUA) fue mayor.

-Se recomienda evaluar una lámina de riego del 80% de las necesidades hídricas y un factor de corrección de porcentaje de drenaje entre 30 y 40%, para tratar de conservar la calidad de los tallos florales.

5. Bibliografía

Abad, M., P.F. Martínez, M.D. Martínez, y J. Martínez. (1993). Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. Actas de Horticultura, 11, 141-154.

Abad, M., y Noguera, P. (1998). Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación, En: Fertirrigación, Cultivos hortícolas y ornamentales, segunda edición. Madrid, Cadahia, C. (Ed). Ediciones Mundi Prensa, 290-339.

Ackerson, R.C., (1985). Osmoregulation in cotton in response to wáter stress. HortScience, 28, 50-52.

Aguilar-Rivera, N., Algara, M., y Olvera, L. A. (2015). Gestión del agua como factor limitante de productividad cañera en México. Revista de geografía Norte Grande, 60, 135-152.

Álvarez, M. (1980). Agrotecnia de los rosales. En: Floricultura. La Habana. Editorial Pueblo y Educación pp.505-545.

Álvarez, S. (2011). Riego deficitario en distintas etapas del desarrollo de plantas ornamentales cultivadas en maceta. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Cartagena.

Allaire, S., Caron, J., Ménard, C. y Dorais, M. (2004). Growing media varying in particle size and shape for greenhouse tomato. Acta Hort. (ISHS) 644, 307-311.

Allen, R., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (Boletín 56 ed.). Roma. Estudio FAO riego y drenaje.

Amézquita, E. (1999). Requerimientos de agua y nutrición de cultivos de flores. XI Congreso Nacional Agronómico / Congreso Nacional de Suelos. Cali- Colombia.

Ansorena, M. J. (1994). Sustratos: propiedades y caracterización. Madrid. Ediciones Mundi-Prensa.

Ao, Y., Sun, M., y Li, Y. (2008). Effect of organic substrates on available elemental contents in nutrient solution. Bioresource Technology, 99,5006-5010.

Arenas, M. C. (2011). Efecto de la utilización de doble línea de riego por goteo en el cultivo de pera (Pyrus Communis L.) variedad triunfo de viena. (Tesis de Maestría). Bogotá Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Arévalo, J. J. (2011). Evaluación del efecto de aplicación de diferentes láminas de riego en el cultivo de rosa (Rosa sp) cv freedom, bajo invernadero en la sabana de Bogotá. (Tesis de Maestría). Bogotá Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Arreaza P. (2000). Técnicas básicas del cultivo del clavel, En: Pizarro, de Márquez, M, Clavel (dianthus caryophyllus), Bogotá, Ediciones Hortitecnia Ltda, 15-40.

Asocolflores. (2014). Asociación colombiana de exportadores de flores. Reporte anual de sostenibilidad. Recuperado el 20 de Octubre de 2015, de www.asocolflores.org.

Asocolflores. (2015). Asociación colombiana de exportadores de flores. Boletín estadístico 2015. Recuperado el 15 de Noviembre de 2015, de www.asocolflores.org.

Azcón-Bieto J., y Talón, M. (2001). Fundamentos de Fisiología Vegetal. Interamericana MxGraw-Hill. Barcelona, España.

Barrientos, F., J.C., Alvarado M., F.A. y Flórez R., V.J. (2011). Cálculo de costos de producción de rosas de corte en invernadero en la sabana de Bogotá. En: Flórez R., V.J. (Ed.). Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia. pp. 15-36.

Beltri, E. S. (2008). Medida del Balance hídrico y estimación del coeficiente Kc en fincas de la vega Baja del Segura para la mejora de la programación de riegos. Murcia – España.

Bennett, J.M. (1990). Problems Associated with Measuring Plant Water Status. Department of Agronomy, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Gainesville, 35(12), 1551-1554.

Bolla, A., Voyiatzis D., Koukourikou-Petridou, M., y Chimonidou, D. (2010). Photosynthetic parameters and cut-flower yield of rose 'Eurored' (H.T.) are adversely affected by mild water stress irrespective of substrate composition. Scientia Horticulturae, 126, 390–394.

Burés, S. (1997). Sustratos. Ediciones Agrotecnicas S, L Madrid. ISBN 84-87480-75-6.

Cáceres, L.A., Nieto, D.E., Flórez, V.J., y Chaves, B. (2003). Efecto del ácido giberélico (GA3) sobre el desarrollo del botón floral en tres variedades de rosa (*Rosa sp.)*. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Calderón, F., y Cevallos, F. (2001). Calderón Laboratorios Ltda. Los sustratos. Disponible en: www.drcalderonlabs.com. Consultado en Enero de 2016.

Calderón, F. (2002). Calderón Laboratorios Ltda. La cascarilla de arroz Caolinizada; Una alternativa para Mejorar la retención de Humedad Como sustrato para Cultivos hidropónicos. Disponible en: www.drcalderonlabs.com. Consultado en Enero de 2016.

Chaparro, L.A., Farías, A., Chaves, B., Miranda, D., y Flórez, V.J. (2006). Análisis de crecimiento en rosa variedad 'Charlotte' en los sistemas de cultivo en sustrato y en suelo. En: Avances sobre fertirriego en la floricultura Colombiana. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia, pp. 77-90.

Chamindu, T.K., Chen, C.J., Moldrup, P., Wollesen, L., y Tuller, M. (2013). Integral parameters for characterizing water, energy, and aeration properties of soilless plant growth media. Journal of Hydrology, 502, 120-127.

Chimonidou-Pavlidou, D. (1998). Yield and quality of Rose ‘Madelon’ as affected by four irrigation and three shading regimes. Acta Hortic, 458, 95–102.

Chimonidou-Pavlidou, D. (1999). Irrigation and sensitive stages of rose development. Acta Hortic, 481, 393-402.

Contreras, K., Contreras, J., Corti, M., De Sousa, J., Durán, M., y Escalante, M. (2008). El agua un recurso para preservar. Universidad de los Andes. Facultad de medicina.

Corcuera, L. (2003). Comparación de métodos para generar curvas de presión-volumen en especies del género *Quercus.* Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales, 12(1), 111-121.

Cuervo, B., W.J., Flórez, R., V.J., y González, C.A. (2011). Generalidades de la automatización y control para el reciclaje de drenajes en cultivos bajo cubierta. En: Flórez R., V.J. (Ed.). Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia, pp. 247-275.

De Hoog, Jr. J. (2001). Handbook of modern greenhouse rose cultivation. Applied plant research. Netherlands, pp 140-147.

Díaz, D.M. (2015). Evaluación de la respuesta a la aplicación de riego deficitario controlado en cultivo de pera variedad triunfo de viena (*Pyrus communis* L.). (Tesis de Maestría). Bogotá Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Díaz, D. M., Vélez-Sánchez, J. E., y Rodríguez, P. (2016). Irrigation reduction resistance mechanisms in the rapid fruit growth stage of pears (Pyrus communis L.). Agronomía Colombiana, 34(1), 25-32.

Dixon, M.A., Butt, J.A., Murr, D.P., y Tsujita, M.J. (1988). Water relations of cut greenhouse roses: the relationships between stem water potential, hydraulic conductance and cavitation Scientia Horticulturae, 36, pp. 109–118.

Esmeral, Y. R. (2011). Análisis de la Evapotranspiración real en el cultivo de la Rosa. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Esmeral V., Y.R., González M., C.A., y Flórez R., V.J. (2011). Evapotranspiración en plantas de rosa cv. Charlotte en condiciones de invernadero en la sabana de Bogotá. En: Flórez R., V.J. (Ed.). Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia. pp. 109-126.

FAO. (2002). Deficit irrigation practices. Water Reports. Rome-Italy. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (2013). Informe sobre temas hídricos. Afrontar la escases de agua, Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. Roma-Italia. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

FAO. (2015). Towards a water and food secure future, critical Perspectives for Policy-makers. Rome-Italy. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Ferreyra, R., Selles, G., Maldonado, P., Celedón, J., y Gil, P. (2007). Efecto del clima, de las características de la hoja y de la metodología de medición en el potencial hídrico xilemático en palto (*Persea americana* Mill.). Agricultura técnica (CHILE) 67(2):182-188.

Flórez, V. J., Miranda, D., Chaves, B., Chaparro, T., Cárdenas, C.A., y Farías, A. (2006). Parámetros considerados en el análisis de crecimiento en rosa y clavel en los sistemas de cultivo en suelo y en sustrato. En: Avances sobre fertirriego en la floricultura Colombiana. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia, pp. 44-52.

Folegatti, M., Casarini, E., y Blanco, F. (2001). Greenhouse irrigation water depths in relation to rose stem and bud qualities. Scientia Agricola, 58(3), 465-468.

Fonteno D, C. (1999). Sustratos: tipos y propiedades fisicoquímicas, In: reed, d, Agua, sustratos y nutrición, Hortitecnia, P 93-123.

Francisco, M.R. (2010). Producción de rosas (*Rosa sp*) y su importancia económica. Trabajo de grado. Departamento de Agroecología. Universidad Autónoma Agraria 'Antonio Narro'. Torreón, México.

García, D.C. (2015). Manejo de injertos en rosa, en una finca comercial de la sabana de Bogotá. Trabajo de grado. Facultad de ciencias básicas y aplicadas. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá.

Guzmán P., J.M. (2011). Reutilización de aguas residuales para riego en agricultura. En: Flórez R., V.J. (Ed.). Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia. pp. 127-151

IGAC. (2000). Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca. Bogotá- Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

IGAC. (2012). Levantamiento detallado de suelos en las áreas planas de 14 municipios de la Sabana de Bogotá. Bogotá- Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Intrigliolo, D. S. (2011). Utilización de los sensores de la medida del estado hídrico del suelo y de la planta para la programación del riego. Catedra Internacional Automatización y control en sistemas de producción agropecuaria (págs. 1-51). Bogotá - Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Kroeff, S.J., Dutra, De Souza., y Normann. K. A. (2002). Physical and chemical properties of substrates with mineral and organic origin for growth of potted plants. Ciência Rural, Santa Maria, 32, (6), 937-944.

Kumar, V., Guerrero, F. M., Tansel, B., y Savabi, M. R. (2010). Hydro-physical characteristics of selected media used for containerized agriculture systems. Agricultural Water Management, 98, 314–320.

Lieth, J. H., and Oki, L. R. (2008). Irrigation in Soilless Production. Soilless Culture. pp. 117-156.

Liu, F., Cohen, Y., Fuchs, M., Plaut, Z., y Grava, A. (2006). The effect of vapor pressure deficit on leaf area and water transport in flower stems of soil-less culture rose. Agricultural Water Management. 81, 216-224.

MADS. (1997). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Ley 373 de 1997. Recuperado el 08 de Febrero de 2016, de: https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/leyes/1997/ley_0373_1997.pdf .

Martínez, P.F., y Roca, D. (2011). Sustratos para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo. En: Flórez R., V.J. (Ed.). Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia. pp. 37-78.

Melgarejo, L.M., Romero, M., Hernández, S., Barrera, J., Solarte, M.E., Suárez, D., Pérez, L.V., Rojas, A., Cruz, M., Moreno, A.L., Crespo, S.C., y Pérez, W.H. (2010). Experimentos en fisiología vegetal. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Meneses, V. (2004). Caracterización física, en función del tiempo de uso, del sustrato empleado en cultivos de clavel del grupo América flor Ltda. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Mora L. (1999). Sustratos para cultivos sin suelo o hidroponía. XI Congreso Nacional Agronómico/ III Congreso Nacional de Suelos. San José (Costa Rica).

Moreno, L. P. (2009). Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. Agronomía Colombiana, 2(27), 179-191.

Nappi, P., y Barberis, R. (1993). Compost as growing médium: chemical, physical and biological aspects. Act Hort. (ISHS) 342: 249-257.

Nirit, B., Bar Tal, A., y Friedman, H. (2006). Application of treated wastewater for cultivation of roses (Rosa hybrida) in soil-less culture. (D. o. Produce, Ed.) Scientia Horticulturae, 108, 185 -193.

Oki, L. R., y Lieth, J.H. (2004). Effect of changes in substrate salinity on the elongation of Rosa hybrida L. 'Kardinal' stems. Scientia Horticulturae, 101, 103-119.

Oliveira, V., Freire, F., Venturin, R., Carrijo, O., y Mascarenhas, M. (2002). Caracterização física de substratos para a produção de hortaliças, In: 43 congresso brasileiro de olericultura, V 21, pp. 287-287.

Örgen, E., y Öquist, G. (1985). Effects of drought on photosynthesis, chlorophyll fluorescence and photoinhibition susceptibility in intact willow leaves. Planta 166, 380–388.

Patiño, M. (2000). Cultivo de clavel sobre sustrato de cascarilla de arroz, en Pizano, M. El Clavel Ediciones Hortitecnia, Bogotá Colombia.

Pérez, S.J. (2011). Análisis de crecimiento y comportamiento de los nutrientes en clavel (*Dianthus caryophyllus* L.) variedad Delphi en un sistema de cultivo en sustrato en la sabana de Bogotá. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá

Petitt, E. I. (2011). Caracterización química de un suelo y tres mezclas de sustrato en rosa (*Rosa hybrida*) variedad charlote en un sistema de cultivo a solución perdida. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Polanía, J., Mejía de T, S., y Rodríguez, A. (2003). Curva Presión Volumen de la caña de azúcar variedad CC 8592 en condiciones del Valle del Cauca. Acta Agronómica, 52(1-4), 71-76.

Quintero, M. F., y González-Murillo, C. A. (2004). Determinación de la curvas de retención de humedad para sustratos utilizados en cultivos de flores de la sabana de Bogotá, Articulo para presentar al VI Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola Clia 2004, Costa Rica,

Quintero, M. F. (2009). Propiedades Hidro-físicas De Cuatro Sustratos Usados En Cultivos De Flores De Corte En La Sabana De Bogotá. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá

Quintero C., M.F., González M., C.A., y Guzmán P., J.M. (2011). Sustratos para cultivos hortícolas y flores de corte. En: Flórez R., V.J. (Ed.). Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia. pp. 79-108.

Quintero, M. F., Ortega, D. Valenzuela, J. L., y Guzmán, M. (2013). Variation of hydro-physical properties of burnt rice husk used for carnation crops: Improvement of fertigation criteria. Scientia Horticulturae, 154, 82–87.

Raviv, M., y Blom, T.J. (2001). The effect of water availability and quality on photosynthesis and productivity of soilless-grown cut roses. Scientia Horticulturae, 88, 257-276.

Raviv, M., Lieth, J, H., Bar-Tal, A., y Silber, A. (2008). Growing plants in soilless culture: operational conclusions. Soilless Culture. pp. 545-571.

Rodríguez, M. (1998). Estudio del consumo de agua para un cultivo de rosa bajo invernadero ubicado en el Rosal (Cund.). Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Rodríguez, W. E., y Flórez, V. J. (2006). Comportamiento fenológico de tres variedades de rosas rojas en función de la acumulación de la temperatura. Agronomía Colombiana, 24(2), 238-246.

Rodríguez, P., Mellisho, C., Conejero, W., Cruz, Z., Ortuño, M., Galindo, A., y Torrecillas, A. (2012). Plant water relations of leaves of pomegranate trees under different irrigation conditions. Environmental and Experimental Botany, 77, 19-24.

Salgado, O. (2000). Estudio de la variabilidad espacial de la conductividad hidráulica no saturada en suelos salidos, Trabajo realizado para optar al título de Magíster en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Sánchez, M, y Carvacho, L. (2006). Estimación de evapotranspiración potencial, ETP, a partir de imágenes NOAAAVHRR en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Revista de geografía Norte Grande, (36), 49-60.

Scholander, P., Hammel, H. T., Bradstreet, E., y Hemmingsen, E. (1965). Sap presure invascular plants: Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. Science 184, 339-346.

Shinozaki, K., y K. Yamaguchi-Shinozaki. (2007). Gene networks involved in drought stress response and tolerance. J. Exp. Bot, 58(2), 221-227.

Soria, B.E. (2013). Efecto de tres tinturas sistémicas en diferentes tiempos de deshidratación para tinturación de rosas (R*osa sp.*) variedad Vendela. Trabajo de grado. Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Quevedo, Ecuador.

Torrecillas, A. (2011a). Sensores en las plantas para la programación del riego Árboles inteligentes. Catedra Internacional Automatización y control en sistemas de producción agropecuaria (págs. 1-30). Bogotá - Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Torrecillas, A. (2011b). Importancia del agua. Aspectos Ecofisiológicos. Catedra Internacional Automatización y control en sistemas de producción agropecuaria (págs. 1-17). Bogotá - Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Torrecillas, A. (2011c). Mecanismos de las plantas para afrontar una situación de estrés. Catedra Internacional Automatización y control en sistemas de producción agropecuaria (págs. 1-38. Bogotá - Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Torrecillas, A. (2011d). Parámetros más utilizados en relaciones agua-planta. Catedra Internacional Automatización y control en sistemas de producción agropecuaria (págs. 1-61. Bogotá - Colombia: Universidad Nacional de Colombia

Urban, L., y Six, S. (2002). Effect of elevated CO2 on leaf water relations, water balance and senescence of cut roses. Journal of plant physiology, 159, 717 - 723.

Valladares, F., Vilagrosa, A., Peñuelas, J., Ogaya, R., Camarero, J. J., Corcuera, L., Sisó, S., y Gil-Pelegrín, E. (2004). Estrés hídrico: ecofisiología y escalas de la sequía. En: Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Páginas 163-190. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid. ISBN: 84-8014-552-8.

Van Doorn, W., y Vojinovic, A. (1996). Petal Abscission in Rose Flowers: Effects of WaterPotential, Light Intensity and Light Quality. (A. R. Institute, Ed.) Annals of Botany, 78, 619 - 623.

Van Genuchten, M.Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 44(5), 892-898.

Van Genuchten, M., Leij F, y Yates, S. (1991). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soil, Riverside. California. U.S Salinity Laboratory. U.S Department of Agricultural and Agricultural Research Service.

Vélez, N. A., Flórez, V. J., y Flórez, A. F. (2014). Comportamiento de Variables Químicas en un Sistema de Cultivo sin Suelo para Clavel en la Sabana de Bogotá. Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín, 67(2): 7281-7290.

Vélez, J., Intrigliolo, D., y Castel, J.R. (2007). Scheduling deficit irrigation of citurs trees with maximum daily trunk shrinkage. Agricultural water management, 90, 197-204.

Villaseñor-López, O. A., García, Y., Tamayo-Esquer, L.M., Bonilla, M., y Fernandez-Bocardo, J.A. (2012). Parámetros hídricos de Cedrela odorata L. cultivada en la zona

semiarida del Valle del Yaqui, Sonora, México. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales, 8 (2): 56-62.

Wallach, R. (2008). Physical Characteristics of Soilless Media. Soilless Culture. pp. 41-116.

Xiong, L., Schumaker, K S., y Zhu, J. K. (2002). Cell signalling during cold, drought, and salt stress. Plant Cell, 14, 165-183.

Yong, Ania. (2004). El cultivo del rosal y su propagación. Cultivos Tropicales, 25, 53-67.