



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS**

**RESPUESTA DEL JITOMATE EN CONDICIONES PROTEGIDAS, A LA  
HUMEDAD APROVECHABLE ESTIMADA CON TDR.**

**VICENTE ALVAREZ HERNANDEZ**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO.**

**2015**

La presente tesis, titulada: **Respuesta del Jitomate en condiciones protegidas, a la humedad aprovechable estimada con TDR**, realizada por el alumno: **Vicente Alvarez Hernandez**, bajo la dirección del consejo particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS  
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



---

DR. CARLOS RAMÍREZ AYALA

ASESOR:



---

DR. ROBERTO ASCENCIO HERNÁNDEZ

ASESOR:



---

DR. ANSELMO LÓPEZ ORDAZ

Montecillo, Texcoco, México, Mayo de 2015.

# RESPUESTA DEL JITOMATE EN CONDICIONES PROTEGIDAS, A LA HUMEDAD APROVECHABLE ESTIMADA CON TDR.

Vicente Alvarez Hernandez, MC.

Colegio de Postgraduados, 2015

## RESUMEN

Con la finalidad de determinar los requerimientos de agua y la relación entre la humedad del sustrato y el cultivo de jitomate (*Solanum Lycopersicum* L.) de crecimiento indeterminado, se estableció un experimento en invernadero el 06 de Mayo de 2014 y finalizado el 28 Julio de 2014 en el Colegio de Postgraduados, Texcoco México, el cual consistió de tres tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR) en arreglo completamente al azar con cuatro repeticiones. Los porcentajes de humedad manejados fueron 80% HAR, 50% HAR y 30% HAR, se determinó el momento de riego con base a lecturas de humedad en el sustrato de tezontle realizadas con un equipo de reflectometría TDR para regresarlo a su capacidad de campo sin drenaje. Las raíces se evaluaron en tres capas iguales de 7cm. Las variables evaluadas fueron materia fresca y seca en raíz, tallo, flor, fruto, hoja y podas de brotes axilares y requerimientos hídricos por tratamiento. Los resultados indicaron que en el tratamiento con 30% HAR la raíz presento más desarrollo y por lo tanto mayor acumulación de materia seca. Los tratamientos con 80% HAR y 50% HAR registraron mayor producción de biomasa aérea. Los requerimientos de agua totales fueron los siguientes: 108.46L  $\text{pl}^{-1}$  (80% HAR), 96.73L  $\text{pl}^{-1}$  (50% HAR) y 89.66L  $\text{pl}^{-1}$  (30% HAR) además se comprobó que el TDR fue un método adecuado para la programación de riegos.

**Palabras clave:** *Solanum Lycopersicum* L, raíz, reflectometría, riego.

# RESPONSE OF TOMATO IN PROTECTED CONDITIONS, TO AVAILABLE MOISTURE ESTIMATED WITH TDR

Vicente Alvarez Hernandez, MSc.

Colegio de Postgraduados, 2015

## ABSTRACT

In order to determine water requirements and the relationship between soil moisture and cultivation of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) indeterminate, an experiment was established in greenhouse on May 6, 2014 and ended 28 July 2014 in the Colegio de Postgraduados, Texcoco Mexico, which consisted of three treatments of available soil moisture (AM) in complete randomized design with four replications. The percentages of handled humidity were 80% AM, 50% AM and 30% AM, time of irrigation was determined based on readings of moisture in the substrate tezontle performed with a reflectometry TDR device to return it to its field capacity without drainage. The roots were evaluated in three equal layers of 7cm. The variables evaluated were fresh and dry matter in root, stem, flower, fruit, leaf and axillary buds pruning and water requirements per treatment. The results indicated that treatment with 30% AM presented more root development and therefore greater dry matter accumulation. Treatments with 80% and 50% AM registered higher biomass production. Total water requirements were: 108.46L  $\text{pl}^{-1}$  (80% AM), 96.73L  $\text{pl}^{-1}$  (50% AM) and 89.66L  $\text{pl}^{-1}$  (30% AM) also found that a TDR was a suitable method for irrigation scheduling.

**Key words:** *Solanum Lycopersicum* L, root, reflectometry, irrigation.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios padre todopoderoso por haberme dado la existencia y por ayudarme a salir adelante en los momentos difíciles y a la virgen santísima de Guadalupe por su amor incondicional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado para la realización de mis estudios de posgrado.

Al Colegio de Postgraduados campus Montecillo y al posgrado de Hidrociencias por las instalaciones facilitadas para la realización de la presente investigación.

Al Dr. Carlos Ramírez Ayala por su orientación en la formulación de mi proyecto de investigación y por indicarme la mejor manera de realizarlo.

Al Dr. Roberto Ascencio Hernandez por apoyarme con sugerencias para complementar en buena forma este trabajo.

Al Dr. Anselmo López Ordaz por su apoyo durante la revisión de esta tesis.

Al personal de apoyo en el invernadero: Alejandro Nequis y Alejandro Islas por todo el trabajo aportado.

## **DEDICATORIAS**

A mi madre, la Sra. Teodora Hernandez Retana por todo su amor, ella no conoció letra alguna sin embargo siempre me alienta a seguir adelante estudiando.

A todos mis hermanos y hermanas

A mi hermana Rafaela y su esposo Santiago por todo su apoyo durante mi estudios.

A mis sobrinos, en especial los que están en alguna etapa de formación profesional deseando que tengan éxito.

## CONTENIDO

RESUMEN .....	ii
ABSTRACT .....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
DEDICATORIAS.....	v
LISTA DE CUADROS. ....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE CUADROS EN EL APENDICE .....	xiv
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivo general.....	3
2.2. Objetivos específicos .....	3
3. HIPÓTESIS.....	3
4. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
4.1. El agua en México. ....	4
4.2. Requerimientos de riego en los cultivos. ....	5
4.3. Determinación de la humedad. ....	7
4.3.1. El TDR.....	7
4.4. Los sustratos. ....	10
4.4.1. Propiedades físicas y químicas de los sustratos.....	11
4.5. Tezontle como sustrato. ....	14
4.6. La humedad del sustrato. ....	15
4.7. El cultivo de Jitomate. ....	18
5. MATERIALES Y MÉTODOS .....	26
5.1. Ubicación .....	26
5.2. Sustrato. ....	27
5.3. Calibración del TDR.....	29
5.4. Sistema de riego.....	30
5.5. Análisis de agua. ....	31
5.6. Producción de plántula.....	32
5.7. Manejo del experimento. ....	32

5.8.	Diseño experimental y tratamientos.....	33
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
6.1.	Caracterización de los componentes del sistema.....	38
6.1.1.	Agua y solución nutritiva. ....	38
6.1.2.	Propiedades físicas del sustrato .....	41
6.1.3.	Curva de liberación de agua. ....	42
6.1.4.	Calibración del TDR.....	44
6.1.5.	Sistema de riego. ....	45
6.2	Producción de Biomasa. ....	46
6.2.1	Materia fresca y seca del fruto.....	46
6.2.3	Materia fresca y seca del tallo .....	53
6.2.4	Materia fresca y seca de la flor.....	55
6.2.5	Materia fresca y seca de podas de brotes axilares. ....	56
6.2.6	Materia fresca y seca de la raíz.....	58
6.3	Relaciones hídricas. ....	66
6.3.1	Contenido total de agua por planta. ....	66
6.3.2	Aplicación de riegos y porcentajes de humedad en el sustrato. ....	67
6.3.3	Requerimientos de agua.....	73
6.3.4	Eficiencia en el uso del agua. ....	75
7	CONCLUSIONES .....	78
8	LITERATURA CITADA.....	79
9	APENDICE .....	88



## LISTA DE CUADROS.

<b>Cuadro 1.</b> Constante dieléctrica de algunos materiales (Raymond y Jerry, 2011).....	8
<b>Cuadro 2.</b> Propiedades de un sustrato ideal (adaptación de FAO, 2002).....	14
<b>Cuadro 3.</b> Producción de jitomate en México en el año 2013 (Adaptación con datos de SIAP, SAGARPA, 2013).....	19
<b>Cuadro 4.</b> Taxonomía del Jitomate ( <i>Solanum Lycopersicum L.</i> ).....	21
<b>Cuadro 5.</b> Asignación de tratamientos por línea de riego. ....	34
<b>Cuadro 6.</b> Valores para detectar en TDR y minutos de riego a aplicar por porcentaje de humedad aprovechable residual aplicada.....	37
<b>Cuadro 7.</b> Cationes y aniones presentes en el agua de riego utilizada en el experimento. ....	39
<b>Cuadro 8.</b> Balance de fertilizantes para preparar la solución nutritiva con un potencial osmótico de $-0.036 \text{ Mpa}$ y conductividad eléctrica de $1.01 \text{ dS m}^{-1}$ .....	39
<b>Cuadro 9.</b> Balance de fertilizantes para preparar la solución nutritiva con un potencial osmótico de $-0.072 \text{ Mpa}$ y conductividad eléctrica de $2.01 \text{ dS m}^{-1}$ .....	40
<b>Cuadro 10.</b> Balance de microelementos para agregar a la solución nutritiva. ....	40
<b>Cuadro 11.</b> Peso y porcentaje de residuos para cada tamiz en análisis granulométrico de tezontle. ....	41
<b>Cuadro 12.</b> Propiedades físicas del tezontle usado en el experimento para un volumen de muestra de 500mL.....	42
<b>Cuadro 13.</b> Propiedades físicas del tezontle para la elaboración de la curva de liberación de agua. ....	43
<b>Cuadro 14.</b> Contenido de agua en las diferentes secciones de las plantas por fecha de muestreo y humedad aprovechable aplicada.....	66
<b>Cuadro 15.</b> Biomasa total por tratamiento y cantidad de agua evapotranspirada (Et). ....	75
<b>Cuadro 16.</b> Prueba de medias para producción de fruto comercial y numero de frutos. ....	76
<b>Cuadro 17.</b> Eficiencia en el uso del agua ( $\text{Kg}$ de materia por $\text{m}^3$ de agua agregada) para la biomasa total y producción de fruto por tratamiento. ....	76

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Agua aprovechable por las plantas en la cual el punto crítico es el 60% del agua útil entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente (Leiton, 1985) .....	17
<b>Figura 2.</b>	Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Núñez, 2000).....	23
<b>Figura 3.</b>	Invernadero para el experimento.....	26
<b>Figura 4.</b>	Diagrama del cabezal de riego, TA: Toma de agua, VA: Valvula antiretorno, VP: Valvula de presurizado, M: Manometro, B: Bomba, F: Filtros, EV: Electrovalvulas, LR: Lineas regantes, Vai: Valvula de aire, IB: Interruptor de bomba, TMP: Temporizador, TC: Toma de corriente.....	31
<b>Figura 5.</b>	División de las bolsas con sustrato en capas de igual profundidad para la detección de humedad con TDR en cada una. ....	33
<b>Figura 6.</b>	Fragmento de una línea de riego que indica la forma de seleccionar las plantas para muestreo, plantas para muestreo en color verde y plantas en color naranja no se muestrean.....	34
<b>Figura 7.</b>	Diagrama de flujo con las principales sentencias para programa de cálculo de porcentaje de humedad aprovechable residual y minutos de riego por capa de sustrato.....	37
<b>Figura 8.</b>	Curva de liberación de humedad del sustrato usado en el experimento, MS=Material sólido, CA=Capacidad de aireación, AFD= Agua fácilmente disponible, AR= Agua de reserva, ADD= Agua difícilmente disponible. ....	43
<b>Figura 9.</b>	Relación entre la humedad detectada con TDR y la humedad calculada en el sustrato, ambas en función del volumen.....	44
<b>Figura 10.</b>	Gráficas que relacionan la presión en el sistema y el caudal entregado por los goteros evaluados.....	45
<b>Figura 11.</b>	Calidad de frutos producidos por tratamiento en la segunda cosecha (60 días después de iniciados los tratamientos). 80%HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50%HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30%HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. ....	47

- Figura 12.** Materia fresca del fruto tomada a lo largo del experimento, 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ )..... 48
- Figura 13.** Materia seca del fruto tomada a lo largo del tratamiento, 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ )..... 49
- Figura 14.** Número de frutos tomados a lo largo del experimento, 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ )..... 49
- Figura 15.** Materia fresca de la hoja tomada a lo largo del tratamiento, 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ )..... 51
- Figura 16.** Materia seca de la hoja tomada a lo largo del tratamiento, 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ )..... 52
- Figura 17.** Área foliar en plantas de Jitomate, 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ )..... 52
- Figura 18.** Materia fresca del tallo tomada a lo largo del tratamiento, 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ )..... 53

<b>Figura 19.</b> Materia seca del tallo tomada a lo largo del tratamiento, 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ). .....	54
<b>Figura 20.</b> Materia fresca de la flor, 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ). .....	55
<b>Figura 21.</b> Materia seca de la flor, 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ). .....	56
<b>Figura 22.</b> Materia fresca de podas de brotes axilares, 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ). .....	57
<b>Figura 23.</b> Materia seca de podas de brotes axilares, 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ). .....	58
<b>Figura 24.</b> Materia fresca de la raíz para la capa de sustrato perteneciente a una profundidad de 0 a 7 cm (ES. 0-7), 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ). .....	59
<b>Figura 25.</b> Materia fresca de la raíz para la capa de sustrato perteneciente a una profundidad de 7 a 14 cm (ES. 7-14), 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ). .....	60

- Figura 26.** Materia fresca de la raíz para la capa de sustrato perteneciente a una profundidad de 14 a 21 cm (ES. 14-21), 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ). ..... 61
- Figura 27.** Materia seca de la raíz para la capa de sustrato perteneciente a una profundidad de 0 a 7 cm (ES. 0-7), 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ). ..... 62
- Figura 28.** Materia seca de la raíz para la capa de sustrato perteneciente a una profundidad de 7 a 14 cm (ES. 7-14), 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ). ..... 63
- Figura 29.** Materia seca de la raíz para la capa de sustrato perteneciente a una profundidad de 14 a 21 cm (ES. 14-21), 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ). ..... 63
- Figura 30.** Estrés hídrico en líneas con 30% HAR al momento de llegar a su punto más bajo de humedad. .... 68
- Figura 31.** Humedad en capas para 80% HAR, HAR ESTIMADA= Valor cercano o igual a 80% HAR al momento del riego. ES 0-7= Humedad Aprovechable Residual de 0 a 7 cm, ES 7-14= Humedad Aprovechable Residual de 7 a 14cm, ES14-21= Humedad Aprovechable Residual de 14 a 21cm. .... 70
- Figura 32.** Humedad en capas para 50% HAR, HAR ESTIMADA= Valor cercano o igual a 50% HAR al momento del riego. ES 0-7= Humedad Aprovechable Residual de 0 a 7 cm, ES 7-14= Humedad Aprovechable Residual de 7 a 14cm, ES14-21= Humedad Aprovechable Residual de 14 a 21cm. .... 71

- Figura 33.** Humedad en capas para 30%*HAR*, *HAR ESTIMADA*= Valor cercano o igual a 30%*HAR* al momento del riego. ES 0-7= Humedad Aprovechable Residual de 0 a 7 cm, ES 7-14= Humedad Aprovechable Residual de 7 a 14cm, ES14-21= Humedad Aprovechable Residual de 14 a 21cm. .... 72
- Figura 34.** Agua aplicada (Litros) por tratamiento entre muestreos. 80%*HAR*=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50%*HAR*=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30%*HAR*= 30% de Humedad Aprovechable Residual. .... 73
- Figura 35.** Agua aplicada acumulada (Litros) por tratamiento. 80%*HAR*=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50%*HAR*=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30%*HAR*= 30% de Humedad Aprovechable Residual. .... 74

## LISTA DE CUADROS EN EL APENDICE

<b>Cuadro A- 1.</b> Materia fresca y seca del sistema radical en plantas de Jitomate.....	88
<b>Cuadro A- 2.</b> Materia fresca y seca del tallo en plantas de Jitomate.....	88
<b>Cuadro A- 3.</b> Materia fresca y seca del fruto en plantas de Jitomate.....	89
<b>Cuadro A- 4.</b> Producción de fruto en plantas de jitomate. ....	89
<b>Cuadro A- 5.</b> Materia fresca y seca de la hoja en plantas de Jitomate.....	89
<b>Cuadro A- 6.</b> Área foliar en plantas de jitomate. ....	90
<b>Cuadro A- 7.</b> Materia fresca y seca de la flor en plantas de Jitomate.....	90
<b>Cuadro A- 8.</b> Materia fresca y seca de las podas en plantas de Jitomate.....	90
<b>Cuadro A- 9.</b> Litros de agua agregados por tratamiento en periodos de 21 días más litros de agua agregados desde el trasplante hasta el inicio de tratamientos (8.45L.), en este caso se tomaron éstos valores como el valor de la evapotranspiración para el cálculo de la eficiencia en el uso del agua. HAR= Humedad Aprovechable Residual.....	91
<b>Cuadro A- 10.</b> Eficiencia en el uso de agua para la producción de materia fresca ( $\text{kg m}^{-3}$ ) en periodos de 21 días. HAR= Humedad aprovechable residual.....	91
<b>Cuadro A- 11.</b> Eficiencia en el uso de agua para la producción de materia seca ( $\text{kg m}^{-3}$ ) en periodos de 21 días. HAR= Humedad aprovechable residual.....	91
<b>Cuadro A- 12.</b> Horarios de riego para el tratamiento con 80% HAR, para cada día de tratamiento (año 2014) .....	92
<b>Cuadro A- 13.</b> Horarios de riego para el tratamiento con 50% HAR para cada día de tratamiento (año 2014) .....	94
<b>Cuadro A- 14.</b> Horarios de riego para el tratamiento con 30% HAR, por cada día de tratamiento, los días sin datos no se aplicó riego (año 2014).....	95

## 1. INTRODUCCIÓN

Las especies vegetales en general tienen necesidad de agua para realizar sus funciones metabólicas sobre todo porque es un elemento necesario para el transporte de nutrientes desde la raíz hasta la parte aérea y para transpirar vapor de agua a la atmósfera lo que permite regular la temperatura de las hojas y mantenerlas turgentes.

Cuando una planta se cultiva, es necesario tener en cuenta que sus necesidades hídricas varían según su especie, tamaño y las condiciones climáticas de la zona de que se trate así como del sistema de cultivo adoptado, ya sea en invernadero o a cielo abierto.

Una de las interrogantes a resolver cuando se tiene un cultivo, es determinar el momento y la cantidad de agua que deberá aplicarse para satisfacer las demandas hídricas propias de cada planta. Encontrar el momento óptimo de riego es importante, ya que esto permitirá usar solo la cantidad necesaria y obtener producción aun cuando se tenga limitación en el acceso al agua.

Los métodos usados para definir el momento y cantidad de riego se han basado por una parte en el uso de datos climáticos con los cuales se calcula el agua necesaria para mantener un nivel de humedad en el suelo mediante un balance hídrico climático cuando se tienen cultivos a cielo abierto. En el caso de cultivos en invernadero la precipitación no es importante en el balance hídrico.

Los requerimientos de agua en un cultivo, también se pueden determinar mediante el uso de sensores de humedad. Con estos aparatos se puede cuantificar la cantidad de agua en el suelo por unidad de volumen lo cual se puede convertir a lámina de agua existente. Uno de estos instrumentos de medición es el TDR (Time Domain Reflectometry, por sus siglas en inglés), el cual funciona mediante impulsos eléctricos detectando variaciones en la cantidad de agua respecto al suelo.

La aplicación de agua a la parte radical de la planta mediante el uso del TDR es un método confiable ya que si la cantidad de agua en el suelo está bien detectada, se pueden definir los mililitros necesarios para llevar el suelo o sustrato desde cierto porcentaje de humedad aprovechable residual (HAR) hasta capacidad de campo (CC), u otro nivel de humedad previamente definido.



Lo anterior es importante ya que permite, mediante la medición de la humedad en intervalos de tiempo regulares, determinar el momento oportuno de aplicar el riego y mantener un nivel de humedad adecuado para satisfacer las demandas del cultivo.

Cuando en las especies vegetales cultivadas se hacen determinaciones de humedad a lo largo de un ciclo de producción, es posible distinguir diferencias en los requerimientos hídricos durante sus etapas de desarrollo. Además, contrastando la respuesta de los cultivos a diferentes niveles de humedad aprovechable, es posible identificar las afectaciones que pueden producir bajos porcentajes de humedad aprovechable y diferencias con distinta humedad en un cultivo en particular.

En el presente trabajo de investigación se evaluaron diferentes porcentajes de humedad aprovechable residual aplicados al sustrato en un cultivo de jitomate (*Solanum Lycopersicum* Mill.) para lo cual se determinó el contenido de humedad en el sustrato mediante un sensor TDR y se analizaron los datos obtenidos de materia fresca y seca para determinar diferencias entre tratamientos, además, se obtuvieron datos de eficiencia en el uso del agua y cálculo de necesidades hídricas en la planta para cada tratamiento.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo general.**

Determinar el momento de la aplicación del riego en un cultivo de Jitomate tipo Saladette, producido en condiciones protegidas mediante la estimación de la humedad en el sustrato con un sensor de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR).

### **2.2. Objetivos específicos**

- a) Encontrar el momento más oportuno de riego con el empleo de un sensor de humedad tipo TDR.
- b) Aplicar la cantidad de agua necesaria al cultivo mediante riego por goteo para aumentar el porcentaje de humedad desde un valor predeterminado hasta capacidad de campo (CC) sin drenaje.
- c) Encontrar la eficiencia en el uso del agua en la producción de biomasa total y biomasa del fruto para los tratamientos evaluados.

## **3. HIPÓTESIS**

- a) Es posible determinar los niveles de humedad aprovechable residual con el empleo de TDR en el sustrato utilizado.
- b) Se puede determinar el momento de riego y la cantidad de agua a aplicar para un cultivo de Jitomate bajo riego por goteo usando un dispositivo de reflectometría TDR.
- c) El cultivo presentará diferencias en su desarrollo y producción de fruto en respuesta a los diferentes porcentajes de humedad aprovechable residual establecidos y se reflejara en la eficiencia en el uso de agua.

## 4. REVISIÓN DE LITERATURA

### 4.1. El agua en México.

El agua es el recurso más importante para el desarrollo de la sociedad humana, para las plantas y los animales, se estima que del total de agua que existe en el planeta (aproximadamente  $1\ 385\ 984\ 610\text{km}^3$ ) solo el 2.5% está disponible para consumo humano al no considerarse salina, de esta cantidad, el 30.1% es agua subterránea, el 69.5% es agua perteneciente a glaciares, nieve, hielo y permafrost y el 0.4% son lagos, ríos, humedad del suelo y aire, humedales y el agua presente en plantas y animales. (CONAGUA. 2013).

En el caso de México la cantidad de agua que se tiene se divide en sectores de uso consuntivo, los cuales ocupan los siguientes porcentajes: Agrícola 75.7% (uso agrícola, pecuario, acuacultura), abastecimiento publico 14.6% (uso público urbano y domestico), industria autoabastecida 4.1% (uso industrial, agroindustrial, sector servicios y comercio), energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad 5.5% (generación de electricidad sin hidroeléctricas) (CONAGUA. 2014).

Los problemas que llevan a considerar la búsqueda de alternativas para darle un mejor uso al agua en la agricultura son que este sector ocupa mayor cantidad del recurso, además de que en años anteriores se han presentado problemas de sequia lo que reduce aun mas el acceso al agua. Por otra parte, en el país el agua esta distribuida de forma desigual ya que en la parte sur se encuentra la mayor cantidad de agua y en la parte norte hay menos disponibilidad de agua con una condencion de poblacion mayor.

En lo que respecta a la agricultura, el agua es necesaria para que los cultivos puedan crecer y desarrollarse; es el principal elemento para que las plantas lleven a cabo funciones metabólicas. Si se cuenta con la cantidad suficiente y disponible se pueden obtener altos rendimientos en los diversos cultivos, uno de los principales factores a considerar en la agricultura es la producción de fruto o materia vegetal por unidad de agua aplicada que es la eficiencia con la que se usa el agua. Dependiendo de las condiciones de manejo y climáticas se obtendrán diferentes valores de eficiencia en el uso del agua.

## **4.2. Requerimientos de riego en los cultivos.**

Para determinar la cantidad de agua que necesita un cultivo se deben tomar en cuenta diversos factores, principalmente la dinámica con la que se mueve el agua desde el suelo, la planta y hasta la atmosfera. El agua presente en el suelo se evapora utilizando para ello energía térmica, cuando el agua pasa del estado líquido al gaseoso, tras la adición de energía se presenta el cambio de fase, la energía asociada a este cambio de fase se denomina calor latente (Çengel, 2007).

El movimiento de agua que ocurre en la planta está dado por la transpiración que es la expulsión de agua en forma de vapor a través de los estomas de la hoja. El vapor será expulsado en mayor o menor cantidad hacia la atmosfera dependiendo principalmente de la humedad relativa, ya que ésta es un indicador de la cantidad de agua presente en el aire a una determinada temperatura y del agua que la atmosfera puede admitir en forma de vapor (Çengel, y Boles, 2003).

El agua que requiere un cultivo es la suma de la evaporación del agua y de la transpiración de las plantas, en términos técnicos se denomina evapotranspiración (FAO, 2006). En cultivos a cielo abierto, la evaporación ocurre después de la lluvia o riego y es más alta cuando el cultivo es pequeño; cuando el cultivo está más desarrollado el factor más importante a considerar es la transpiración. En cambio en condiciones de invernadero la evapotranspiración es menor por lo tanto también los requerimientos de agua, lo cual se debe a la menor radiación recibida y poca influencia del viento.

En el cálculo de las necesidades hídricas de un cultivo se consideran variables como radiación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, además factores propios del cultivo como lo son tipo de cultivo, etapa de crecimiento así como condiciones de manejo las cuales pueden considerarse en una ecuación de cálculo.

La evapotranspiración total es la suma de la evapotranspiración de referencia multiplicada por un coeficiente de cultivo el cual depende de la etapa de desarrollo del mismo. La evapotranspiración de referencia es aquella que presentaría un cultivo que crece en condiciones óptimas de abastecimiento de agua en las mismas condiciones que el cultivo de estudio

A través del tiempo se han desarrollado formas de estudiar el proceso de evapotranspiración asociado al riego. Los estudios se basan en el uso de fórmulas climáticas (Arévalo *et al.* 2013, Esmeral y González, 2011, Fernández *et al.* 2011), balance hídrico climático (Castro, 2008), uso de lisímetros (Flores *et al.* 2007, Khan *et al.* 1998), aplicación de riego con base a lecturas de un tanque evaporímetro tipo “A” (Enrique *et al.* 2008, González, y Hernandez, 2000, Macías, 2009, Romero *et al.* 2009) incluso detectando variaciones de temperatura en las hojas de las plantas (Rojas, 2009) dado que las plantas mantienen su temperatura con la evaporación.

Aunque el uso de métodos técnicos ayuda a determinar los requerimientos de agua de un cultivo también se ha estudiado la forma de aplicar riego en diferentes cantidades e intervalos para determinar la frecuencia de aplicación y cantidad óptima que permita obtener rendimientos favorables (Macías *et al.* 2010, Pérez *et al.* 2011) y en otros casos en el estudio de la respuesta del cultivo al estrés por supresión de riego (García *et al.* 2004, Martínez y Moreno. 1992, López *et al.* 2001, Luna *et al.* 2012) relacionando el desarrollo del cultivo con la falta de agua, determinando sus métodos de respuesta a la humedad del suelo y encontrando los requerimientos hídricos necesarios para producir satisfactoriamente o en cantidades adecuadas.

Los requerimientos de riego también pueden ser estimados con base en la determinación del contenido de la humedad presente en el suelo, este es un método que no precisa tanto del uso de variables climáticas, sino solo del agua que puede estar disponible para las plantas en el sustrato y de la cantidad de agua que se debe agregar para que la planta absorba el agua con mayor facilidad.

En todos los casos de estudio mencionados las incógnitas son, la cantidad de agua necesaria para el cultivo y el momento de la aplicación más apropiada del riego y, debido a que el clima es muy variable, es importante considerar el lugar de estudio. La aplicación oportuna del riego es uno de los factores que influyen en los resultados de desarrollo del cultivo, ya que tanto si se aplica más o menos agua de la requerida por la planta se presentaran anomalías en crecimiento y desarrollo; deficiencia hídrica causara marchitez y baja producción; mientras que, un exceso de agua también puede provocar que las plantas reduzcan su crecimiento debido al aumento de pH del suelo (González *et al.* 2006).

### **4.3. Determinación de la humedad.**

Para determinar el contenido de agua de un sustrato se conocen diferentes métodos, pero el más aproximado de humedad es el método gravimétrico en el cual la humedad es la relación entre el contenido de agua de una muestra de suelo dividido entre el peso seco de la muestra. A partir del conocimiento de la cantidad de agua en el suelo se pueden encontrar relaciones con otras variables físicas.

Las técnicas existentes para la determinación de la humedad pueden tener diferentes bases pero en todas se relaciona el contenido de agua del sustrato con algún cambio físico o químico. Por ejemplo, a mayor contenido de agua en el suelo o sustrato se puede lograr una reacción química más grande (Speedy), habrá mayor conductividad eléctrica (bloques de resistencia eléctrica), se generara poca retención por parte de las partículas del suelo (tensiómetros) o el hidrogeno del agua disminuirá la velocidad de un mayor número de neutrones (aspersor de neutrones). También, el cambio en la frecuencia en un campo eléctrico estará en función del contenido de agua (FDR) y, el contenido de agua en el suelo puede modificar su constante dieléctrica, la cual puede detectarse con un dispositivo de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR).

La mayoría de los dispositivos requieren de una calibración previa, y de conocer los rangos de detección del mismo, las unidades en las cuales trabaja o si es necesario hacer conversión de unidades. En cualquier caso, el uso de algún aparato dependerá además de las condiciones de manejo del cultivo, de su disponibilidad o si se puede adaptar su uso en un sustrato determinado.

#### **4.3.1. El TDR.**

El TDR (En ingles: Time Domain Reflectometry) fue desarrollado en un principio para localizar puntos anómalos en cables coaxiales, al insertar el dispositivo en el suelo, este funciona como un medio aislante, y su constante dieléctrica dependerá de la influencia de cada fase en el suelo: agua, aire y sólidos (Porta *et al.* 2008).

El TDR es un dispositivo que mide la constante dieléctrica del sustrato mediante la determinación del tiempo de recorrido de un pulso electromagnético a través de líneas de transmisión colocadas en el sustrato (Topp *et al.* 1980), esta característica se puede relacionar con el contenido de humedad mediante una función matemática.

El tiempo de recorrido del pulso eléctrico es proporcional a la constante dieléctrica del suelo y ésta varía con el contenido de agua del mismo, este dispositivo se ha usado incluso en estudios hidrológicos resultando fácil de usar, ya que es una técnica que no requiere destrucción de la muestra del suelo (Menziani *et al.* 1996) o su mayor alteración. La constante dieléctrica del agua, así como la de otros materiales se muestra en el Cuadro 1, esta característica indica la facilidad con la que un campo magnético puede pasar a través de un material específico, el valor aproximado para determinaciones en suelo natural puede ser tomado como 4 (Delta-T, 2007), los valores determinados para el agua y el aire (que correspondería al espacio poroso en el sustrato) son 80 y 1 respectivamente.

**Cuadro 1. Constante dieléctrica de algunos materiales (Raymond y Jerry, 2011).**

<b>Material</b>	<b>K (adim)</b>
Vacío	1.0000
Aire	1.0006
Parafina	2.2
Papel	3-7
Cuarzo	4.3
Vidrio	4-7
Porcelana	6-8
Aluminio	8.5
Aceite	2-2.5
Benceno	2.3
Metanol	33
Glicerina	42
Agua	80

Para encontrar el tiempo de recorrido de ida y vuelta de una onda electromagnética que se desplaza a través de una línea de transmisión de longitud L se usa la ecuación 1, en este caso la línea de conducción de la señal es equivalente a las varillas de detección del TDR.

$$t = \frac{2L\sqrt{K}}{c} \quad (1)$$

Donde K es la constante dieléctrica aparente del medio en el que se insertan las varillas (adimensional) y c es la velocidad de propagación de la luz en el vacío ( $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ )

La relación entre la constante dieléctrica (K) y el contenido de humedad del sustrato  $\theta_v$  se relacionan mediante la ecuación 2, la cual es un referente usado por muchos autores y fue estudiada por Topp *et al.* (1980). Esta es una ecuación generalizada que es usada como referencia para la calibración de fábrica del TDR. Los modelos existentes de reflectómetro tienen su propia forma de calibración y uso.

$$\theta_v = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} K - 5.5 \times 10^{-4} K^2 + 4.3 \times 10^{-6} K^3 \quad (2)$$

El TDR ha sido muy usado en estudios diversos los cuales incluyen aspectos agronómicos. Su funcionamiento se ha modelado en laboratorio para verificar la respuesta de sus señales al modificar su configuración electrónica interna (Savi *et al.* 2011) obteniendo resultados adaptables a estudios de humedad. Además, en estudios de laboratorio se ha comprobado la correlación entre la humedad del suelo y la permisividad del agua contrastando los resultados con cálculos realizados mediante el uso de fórmulas (Moret y Lera, 2009).

Al tratarse de sondas que pueden determinar la humedad en el suelo, uno de los problemas durante su uso es la profundidad del mismo ya que las varillas de detección pueden ser muy cortas para estimaciones a más de 10cm de profundidad, este inconveniente se ha intentado resolver colocando diferentes valores de longitud de varillas (L) en las ecuaciones usadas para hallar el valor de la permisividad (Moret *et al.* 2007) con lo cual se puede aproximar un valor para la humedad existente en el suelo.

Aun con el inconveniente de la longitud de las varillas es posible, con un modelo TDR adecuado, la implementación de sondas de detección de humedad en varios puntos del suelo para registrar el valor de la humedad en diferentes lugares y profundidades (Martínez *et al.* 1994) con la finalidad de detectar incluso sus variaciones de humedad en el tiempo.

Aunque un TDR pueda presentar valores predeterminados de detección de humedad para diferentes tipos de suelo y sustratos, es necesario calibrarlos para un suelo en especial si se requiere comprobar la precisión de sus lecturas. Bravo *et al.* (2009) realizaron calibraciones de un equipo TDR en suelos de textura fina encontrando poca relación entre los valores encontrados y los calculados con la ecuación universal (Ec. 2), lo anterior muestra que la



calibración es uno de los procedimientos mas importantes para determinaciones de humedad y que esta actividad debe comprobarse para hallar el modelo que mejor se relacione con el sustrato estudiado.

Las calibraciones realizadas contrastando valores de humedad presente en el suelo con lecturas realizadas con TDR pueden resultar bastante precisas (Insunza *et al.* 2012) encontrando la ecuación de la línea de tendencia para lo cual es importante la elección del sustrato de trabajo y marca y modelo del sensor.

La aplicación de sensores TDR en campo ha mostrado ser un método de fácil aplicación debido a lo directo y rápido de sus lecturas. Los resultados obtenidos indican que es posible mantener un cultivo con la humedad del suelo detectada con sensores TDR (Velasco *et al.* 2008), las lecturas rápidas en un mismo punto son mas fáciles de realizar con este dispositivo, y la aplicación de este método directamente en campo lo hacen válido en trabajos de humedad ya que además no precisa de laboratorio durante su uso.

#### **4.4. Los sustratos.**

Un sustrato es un material solido distinto al suelo natural, el cual por lo general se coloca en una maceta, el sustrato se distingue del suelo por ser un material con mayor cantidad de poros tanto en sus partículas como entre ellas, lo cual asegura un mayor almacenamiento de agua disponible para la planta y aireación suficiente en raíces (Burés, 1997).

La diferencia que existe entre un sustrato y el suelo natural es que este último tiene propiedades físicas y químicas las cuales no pueden ser fácilmente modificables para hacerlas adecuadas para la producción de cultivos; además, algunos suelos tienen propiedades que los hacen no aptos para un cultivo, como son: presencia de patógenos como hongos y bacterias, semillas de maleza, y un mayor incremento de la salinidad tras la aplicación de fertilizantes (Alarcón, 2000).

Por lo general, un sustrato por sí solo no posee las características de porosidad, retención de humedad y aireación por lo cual en algunos casos es necesario hacer mezclas de ellos para obtener el más adecuado para un cultivo (Zamora *et al.* 2005), a esta mezcla o al sustrato solamente se deben complementar sus propiedades nutrimentales ya que la mayoría son inertes.

Las propiedades físicas de los sustratos que se relacionan con la proporción de las fases sólida y gaseosa (aire) y cómo interactúan estas con el agua, prácticamente no se pueden modificar una vez que el cultivo ya está establecido (Bautista *et al.* 2010), por lo cual es muy importante hacer una eficiente selección del sustrato de acuerdo a la finalidad que se le dé y según los requerimientos del cultivo en cuanto a la disponibilidad de agua y desarrollo radical.

Existen diferentes tipos de sustratos que han sido usados agronómicamente, entre ellos hay de diferentes orígenes tanto naturales como sintéticos, aquellos que no aportan nutrimentos a la solución nutritiva de la cual absorben minerales las plantas se consideran inertes, en cambio los que tienen la característica de almacenar, intercambiar o aportar nutrimentos se consideran activos. Los sustratos más usados son: turba o peat moss, fibra de coco, lana de roca, Agrolita, vermiculita, compostas, aserrín, arena y tezontle, y la selección de uno de ellos se hace con base en las características del cultivo, infraestructura, costo y disponibilidad principalmente.

#### **4.4.1. Propiedades físicas y químicas de los sustratos.**

La producción de cultivos en invernadero precisa del conocimiento de las características físicas y químicas del sustrato. Es importante la determinación de las características químicas ya que las plantas se desarrollan en un medio nutritivo y pueden requerir de minerales durante su desarrollo (Sonneveld y Voogt, 2009), la presencia de minerales en el sustrato afectará el desarrollo de las plantas y puede llegar a alterar la composición de la solución nutritiva.

Por otra parte, las propiedades físicas son importantes en tanto que indican el grado de retención de agua fácilmente disponible, aireación y distribución del tamaño de partículas (Baixauli y Aguilar, 2002), lo cual es necesario para el buen desarrollo de las raíces de las plantas, las cuales se mantienen limitadas por el espacio del contenedor.

El espacio poroso total es la fracción del sustrato ocupada por aire y agua, en un sustrato, los macroporos o espacio poroso no capilar son los responsables de la aireación de los suelos, y los microporos o espacio poroso capilar usualmente están llenos de agua, es decir, en un sustrato de textura gruesa hay más macroporos lo cual permite un mejor movimiento del agua y aire, en cambio en texturas arcillosas predominarán los poros capilares

lo cual puede provocar una inadecuada aireación, además de que el agua se encuentra retenida con más fuerza en las partículas pequeñas (Casanova, 2005, Casas, 2012).

El agua fácilmente disponible, es la diferencia entre el volumen de agua retenida por el sustrato después de haber sido saturado con agua y dejado drenar a 10 cm de tensión matricial (succión), y el volumen de agua presente en dicho sustrato a una succión de 50cm de columna de agua. El primer límite es debido a que se requiere de una tensión mínima de 10cm (Equivalente a 10cm de altura del contenedor) para que exista una cantidad mínima de aire. El siguiente límite se refiere a las condiciones en las cuales las plantas se podrían desarrollar libremente, la tensión superior a 50cm puede afectar desfavorablemente el crecimiento y desarrollo de las plantas (Cadahia, 2005). Para el caso de los cultivos lo que interesa de un sustrato es la capacidad de retención de agua fácilmente disponible y no la capacidad de retención total de agua, ya que esta podría no ser fácilmente asimilable para las plantas.

Los sustratos contienen partículas de diferente tamaño, la distribución del tamaño de partículas es una propiedad física fundamental del medio poroso y define la textura del sustrato. El análisis de tamaños de partículas consiste en el aislamiento de varios tamaños de partícula y la determinación de la cantidad de cada tamaño. El material del cual se compone la fase sólida del suelo incluye partículas de varias formas y tamaños además de materia orgánica en su caso.

El tamaño de la partícula y su composición determina la naturaleza y comportamiento del sustrato: su geometría interna y porosidad, sus interacciones con fluidos y solutos, también su compresibilidad y resistencia (Raviv y Lieth, 2008). En un sustrato, las partículas que tienden a ser arcillosas y limosas (0.002-0.05mm) son de importancia para la mantener la humedad, la porosidad del sustrato queda más definida por el contenido de partículas que tienden a ser arenas (0.05-2mm), mientras que las partículas más grandes como la grava permiten la aireación (IGME, 2004).

La densidad aparente de un sustrato es la relación entre el peso seco de una muestra y el volumen total incluyendo poros, sus unidades son  $\text{g cm}^{-3}$ . Por otra parte, la densidad real considera la masa del sustrato entre el volumen total sin incluir poros, la densidad del sustrato es importante ya que puede influir en el desarrollo de las raíces y en el anclaje que estas pueden tener en el sustrato; además, un sustrato es más manejable si presenta baja densidad.

En un sustrato el pH influye en la asimilación de los nutrientes por la planta. Con un pH inferior a 5 pueden presentarse deficiencias de N, K, Ca, Mg, y con valores superiores a 6.5 se disminuye la asimilabilidad del Fe, P, Mn, B, Zn y Cu. (Baixauli y Aguilar, 2002). Los materiales orgánicos presentan mayor capacidad amortiguadora o de regulación de pH que los inorgánicos y por lo tanto, mayor capacidad para mantener constante esta propiedad.

Los sustratos con alto contenido de bicarbonatos pueden elevar excesivamente el pH de la solución del suelo lo cual puede disminuir la absorción de nutrientes, el rango óptimo de pH en el sustrato debe ser de 5 a 6.5. El pH del suelo por sí mismo no ejerce influencia directa sobre las plantas. En el aspecto químico tiene influencia sobre la disponibilidad o fijación de algunos nutrientes del suelo necesarios para las plantas.

La cantidad de sales presente en un sustrato tiene relevancia en cultivos en invernadero. En invernadero la mayor concentración de nutrientes en el sustrato se debe a la adición de fertilizantes para aumentar la calidad de la producción. Los nutrientes del cultivo contribuyen substancialmente a aumentar el potencial osmótico de la solución en el ambiente radical por lo cual es importante el manejo de la conductividad eléctrica con el fin de que el cultivo tenga más facilidad para la absorción de agua.

En invernadero, las condiciones que pueden afectar la salinidad como el clima y el agua se controlan artificialmente. Los efectos de la salinidad en las plantas, se definen como nutricionales cuando los iones presentes en las sales son esenciales para las plantas y tóxicos cuando la planta absorbe en exceso algún ion (Sonneveld y Voogt, 2009).

Cada uno de los sustratos que se usan en cultivos hortícolas presenta características específicas, pero en general las propiedades de cada uno no proporcionan a la planta las condiciones necesarias para su crecimiento, en el Cuadro 2 se muestran las principales características que debe tener un sustrato o mezcla de ellos.

**Cuadro 2. Propiedades de un sustrato ideal (adaptación de FAO, 2002)**

<b>Propiedad</b>	<b>Valor.</b>
Densidad aparente	0.22g cm <sup>-3</sup>
Densidad real	1.44gcm <sup>-3</sup>
Espacio poroso total	85%
Fase solida	10-15%
Contenido de aire	20-30%
Agua fácilmente disponible	20-30%
Agua de reserva	6-10%
pH	5.5-6.5
Contenido de sales solubles	200ppm (2mS cm <sup>-1</sup> )

#### **4.5. Tezontle como sustrato.**

El tezontle es roca ígnea porosa clasificada como basáltica, comúnmente de color rojo oscuro (debido al dióxido de hierro) o negro, proviene de las erupciones volcánicas y en geología se denomina lapilli cuando sus partículas tienen entre 4 y 32mm de diámetro (Besoain, 1985).

En la actualidad el tezontle se usa como sustrato por sus características de porosidad y retención de humedad, es un material económico que se encuentra en grandes depósitos presentes en todos aquellos lugares en donde existen volcanes. En México abundan principalmente en el eje neovolcánico, su principal empleo es para la construcción de caminos y como material de construcción de casas y edificios. Presenta partículas de diferentes tamaños las cuales pueden separarse con una malla por tamizado para obtener muestras de diferente tamaño.

La procedencia del tezontle no garantiza su homogeneidad, en cuanto a la distribución de sus partículas, y por ende influye en sus propiedades físicas, por lo cual la caracterización de este sustrato es importante para determinar con esto las variables agronómicas que son ideales para el desarrollo de un cultivo. En general, la densidad aparente y real aumentan a medida que disminuye el diámetro de la partícula, la capacidad de retención de humedad disminuye a medida que el diámetro de partícula es mayor, Vargas *et al.* (2008)

El tezontle, cuando presenta granulometría fina puede ser considerado como un buen sustrato en comparación con un sustrato de perlita (Hernandez *et al.* 2005), la razón por la cual el tezontle puede producir mejores rendimientos es debido a su buena capacidad para drenar agua lo cual permite que las plantas tengan buena oxigenación.

La granulometría del tezontle influye en los resultados agronómicos de especies florales, en granulometrías finas de 3mm el crecimiento de tulipán es mayor que en tezontle con partículas de 5mm, lo cual puede deberse a que en sus análisis presenta más porcentaje de agua fácilmente disponible y agua de reserva (Trejo *et al.* 2013).

El tezontle usado en invernadero para la producción de jitomate se puede reciclar, sin que sus propiedades físicas cambien lo suficiente para provocar cambios en la producción. Al rehusar tezontle, sus propiedades de retención de humedad se incrementan y disminuye su capacidad de aireación (Rodríguez *et al.* 2013), en grandes producciones se puede llevar a cabo el reciclaje de tezontle lo cual permite ahorrar en la compra de nuevo sustrato, bajo el sistema de reciclaje de tezontle hasta de tres veces se podría mantener la producción con un buen manejo del riego y fertilización.

Cuando las características físicas del tezontle, no son del todo buenas o recomendables para la producción de un cultivo es posible mezclarlo con otro sustrato con la finalidad de mejorar la disponibilidad de agua para el cultivo. San Martín *et al.* (2012), determinaron que el tezontle en diferentes granulometrías puede mejorar sus propiedades en combinación con fibra de coco sobre todo en cuanto a la porosidad total y retención de humedad sin afectar la producción de Jitomate.

En comparación con un sustrato a base de suelo para un cultivo de jitomate, el tezontle puede generar rendimientos significativamente iguales, sin embargo se requiere adicionar más agua al tezontle para generar esta producción por lo que en este caso concluye que el suelo permitiría un ahorro de agua (Ojodeagua *et al.* 2008).

#### **4.6. La humedad del sustrato.**

El contenido de agua en el suelo se puede expresar de tres formas, las cuales son en general relaciones entre el agua y la materia seca del sustrato y quedan establecidas como valores de humedad. Se denomina humedad gravimétrica  $\theta_g$  a la razón que existe entre el peso del agua presente en una muestra de sustrato (g) y el peso de la muestra seca de sustrato (secado en estufa a 105°C por 24 horas). Por otra parte, la humedad también se puede establecer con base a volumen, se denomina humedad volumétrica  $\theta_v$  a la relación entre el

volumen de agua ( $\text{cm}^3$ ) obtenida de una muestra de sustrato secado en estufa y el volumen total del sustrato seco.

Conociendo la densidad aparente del suelo  $D_a$  ( $\text{g cm}^{-3}$ ) se puede obtener la humedad volumétrica a partir de la humedad gravimétrica mediante la siguiente relación:

$$\theta_v = \theta_g * D_a \quad (3)$$

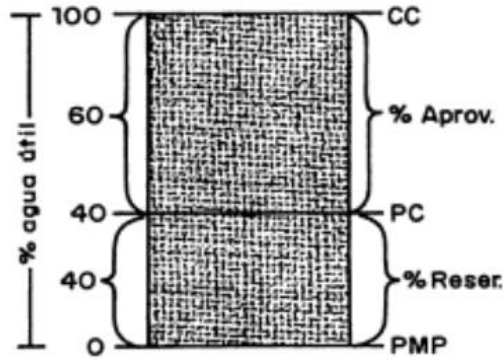
$$\theta_v = \theta_g * D_a = \frac{g_{\text{agua}}}{g_{\text{sustrato}}} * \frac{g_{\text{sustrato}}}{\text{cm}^3_{\text{sustrato}}} = \frac{g_{\text{agua}}}{\text{cm}^3_{\text{sustrato}}} = \frac{\text{cm}^3_{\text{agua}}}{\text{cm}^3_{\text{sustrato}}}$$

Considerando la densidad del agua como  $1 \text{g cm}^{-3}$ .

La densidad real no se usa en este caso ya que esta no incluye el valor del espacio poroso para el agua y el aire necesarios para el desarrollo de la planta.

Estas formas de expresar el contenido de agua en el sustrato solo indicarán la cantidad de agua que contiene este, pero no informan sobre la aprovechabilidad por las plantas; un estudio completo de las características de retención de humedad del sustrato ayuda a saber cuánta agua pueden aprovechar los cultivos (Thorne y Peterson, 1984).

Los cultivos solo pueden aprovechar un porcentaje del total de agua contenida en el sustrato la cual se encuentra entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP). El punto crítico (Figura 1), está definido como el límite en el cual el agua es difícilmente disponible para las plantas, cuando este límite está más allá de la capacidad de campo el agua se pierde por gravedad, por otra parte, al aproximarse al punto de marchitez permanente el agua se encuentra más adherida a las partículas del suelo por lo que es más difícil que sea absorbida por las raíces y generan síntomas de marchitez, Leiton (1985) afirma que el punto crítico puede tomarse como el 50% entre CC y PMP.



**Figura 1** Agua aprovechable por las plantas en la cual el punto crítico es el 60% del agua útil entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente (Leiton, 1985)

Por otra parte según Tarjuelo (1999), el agua entre CC y PMP se denomina intervalo de humedad disponible (IHD) y, para hacer un buen manejo de agua de riego recomienda dejar agotar entre el 30 y 70% del agua útil (obtenida a partir de la humedad disponible) y denomina a este rango déficit permisible de manejo (DPM).

El déficit de humedad del sustrato (DHS) estará definido como la disminución de humedad del suelo por debajo de la capacidad de campo, para este autor el agua aprovechable o reserva fácilmente utilizable considera el 45% de la capacidad de retención del sustrato, intervalo en el cual el agua se encuentra en forma capilar y es fácilmente aprovechable por las plantas.

Dado lo anterior, si en un sustrato se toma el valor de la capacidad de campo y se divide por dos se estará encontrando el valor de la humedad en la que un cultivo no tendrá deficiencias de crecimiento, este valor de humedad será la humedad aprovechable y según el sustrato usado tendrá mayor o menor disponibilidad para las plantas.

Para fines prácticos, será válido tomar como referencia el valor de la capacidad de campo y el valor medio de ésta (punto de marchitez permanente) para establecer los límites de humedad aprovechable que se manejarán para un cultivo.



#### **4.7. El cultivo de Jitomate.**

##### **Generalidades**

El Jitomate, también conocido como tomate rojo en algunas regiones de México, tiene por género *Lycopersicum sp.* Se considera como su centro de origen la región andina de Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia y Chile (Alarcón, 2000.) Fue llevado a diversas partes del mundo por españoles y portugueses. Su domesticación fue llevada a cabo en México. El nombre de jitomate procede del náhuatl xictli, ombligo y tomatl, tomate, que significa tomate de ombligo. Gracias a sus propiedades nutrimentales se comenzó a cultivar en gran parte del mundo, de esta fruta existen varios tipos, los más comunes son: cherry o tipo cereza, saladette y bola en color rojo aunque hay ejemplares en color amarillo.

Para el buen desarrollo del cultivo de Jitomate en invernadero se debe procurar que se tengan condiciones climáticas óptimas. Para Garza y Molina (2008) el lugar de cultivo debe reunir las siguientes condiciones: Su temperatura base es de 10°C, y su temperatura óptima es de 22°C, la temperatura óptima para la germinación está comprendida entre los 25 y 30 °C. Por debajo de los 10° C así como a temperaturas arriba o igual a 40°C la semilla no germina. El rango de temperaturas del suelo debe ser de 12 a 16°C (mínima 10°C y máxima de 30°C) y la temperatura ambiente para su desarrollo de 20 a 24 °C, siendo la óptima 22°C.

Según Jaramillo *et al.* (2006), cuando la temperatura del ambiente es alta se pueden presentar problemas como reducción de la viabilidad del polen y la reducción de la cantidad de flores, puede haber alargamiento de entrenudos y mala fecundación de frutos. En cambio, con temperaturas demasiado bajas los problemas son que las plantas son compactas debido a los entrenudos cortos, además de que pueden presentarse frutos deformes.

El Jitomate tiene un fotoperiodo de 12 horas, la humedad relativa deberá estar entre 60 y 70%. El tomate está clasificado como una hortaliza tolerante a la acidez, con valores de pH de 5.0 – 6.8. En lo referente a salinidad puede tolerar más de 4dSm<sup>-1</sup> aunque su rendimiento puede disminuir con la acumulación de sales en el sustrato, el Jitomate se desarrolla bien en suelos arenosos con buen drenaje.

En México la producción de Jitomate registrada en el año 2013 fue de 2,694,421.39 toneladas las cuales se cosecharon en una superficie de 48,246.01 hectáreas (SIAP, SAGARPA), como se observa en el Cuadro 3. Los principales tipos de jitomate cultivados son Saladette, bola y cherry, los mayores rendimientos se obtuvieron para cultivos de invernadero con 173.91 Mg ha<sup>-1</sup> y jitomate bola de invernadero con 145.33 Mg ha<sup>-1</sup>, sin embargo la mayoría de los sistemas de producción aportan bajos rendimientos lo cual indica que es necesario el uso de mejores tecnologías como el uso de invernaderos tecnificados. En este sentido, para la producción de Jitomate el conocimiento y aplicación de tecnologías de producción son indispensables para obtener mejores rendimientos.

**Cuadro 3. Producción de jitomate en México en el año 2013 (Adaptación con datos de SIAP, SAGARPA, 2013).**

Tipo / Variedad	Superficie. Sembrada	Superficie. Cosechada	Superficie. Siniestrada	Producción	Rendimiento
	ha	ha	ha	Mg	(Mg ha <sup>-1</sup> )
Bola	1,886.50	1,796.50	90	59,381.65	33.05
Bola invernadero	1,631.34	1,631.34	0	237,076.00	145.33
Bola malla sombra	1,170.50	1,170.50	0	100,378.00	85.76
Cherry	449.92	401.92	48	10,485.60	26.09
Cherry invernadero exportación.	10	10	0	97	9.7
Cherry invernadero	42	42	0	1,596.00	38
Cherry malla sombra	26.5	26.5	0	1,813.00	68.42
Cherry orgánico	317.5	302.5	15	5,898.43	19.5
Exportación	599.84	599.84	0	35,637.28	59.41
Industrial	20	20	0	480	24
Invernadero	3,606.11	3,583.27	22.84	623,156.25	173.91
Invernadero exportación	578.3	578.3	0	75,483.66	130.53
Malla sombra	360.9	360.9	0	43,693.50	121.07
Malla sombra exportación	1,545.50	1,545.50	0	130,081.33	84.17
Orgánico	280.7	280.7	0	11,954.00	42.59
Rio grande	400.5	343.5	57	7,847.83	22.85
Rio grande invernadero	4	4	0	260	65
Saladette	32,631.19	31,729.51	901.68	1,027,760.87	32.39
Saladette invernadero	1,732.17	1,732.04	0.13	223,523.89	129.05
Saladette malla sombra	940.54	940.54	0	97,753.90	103.93
Jitomate semilla	12	12	0	63.2	5.27
Total	48,246.01	47,111.36	1,134.65	2,694,421.39	1,420.02

## **Características generales del Jitomate** (Garza y Molina 2008, Nuño 2007)

### **Raíz.**

Raíz principal de tipo pivotante con raíces laterales más largas y fibrosas, al momento del trasplante la raíz principal disminuye su crecimiento debido a la compactación que produce la colocación del cepellón en el sustrato. En cultivo al aire libre el sistema radical puede alcanzar una extensión de 1.5m alrededor de la planta mientras que en contenedor las raíces están más limitadas.

### **Tallo.**

Tallo de consistencia herbácea-leñosa, de diámetro promedio de 2 cm, el tallo de crecimiento determinado produce una planta más arbustiva con muchas ramificaciones. En tallos de crecimiento indeterminado la poda de brotes laterales permite que la planta alcance alturas de más de 4 metros en un solo eje, presenta tricomas glandulares que producen el olor de la planta.

### **Hoja.**

Presenta hojas alternas con peciolo y lobuladas, de bordes dentados, con ejemplares de más de 40 cm de largo, también presentan glándulas productoras de olor y vellosidades.

### **Flor.**

Las flores son hermafroditas, con 5 pétalos de color amarillo dispuestos en forma helicoidal, el ovario puede ser bi o plurilocular, las flores forman inflorescencias en racimos con 3 a 10 ejemplares las cuales se desarrollan cada 2 a 3 hojas a lo largo del tallo.

### **Fruto.**

El fruto es una baya bi o plurilocular, de forma esférica, alargada o lobular, de tamaño y peso variable; la coloración es roja, rosada o amarillenta según la manifestación de licopeno y/o caroteno, está constituido por pericarpio, tejido placentario y semillas.

La clasificación taxonómica del jitomate se muestra en el Cuadro 4, el nombre científico puede presentarse con género *Solanum* o *Lycopersicum*, ya que ambos nombres se pueden considerar sinónimos debido a la controversia que existe en su clasificación por diversos autores, en todo caso *Solanum* y *Lycopersicum* están estrechamente relacionados en cuanto a su origen genético (Flores, 2012).

**Cuadro 4. Taxonomía del Jitomate (*Solanum Lycopersicum* L.)**

<b>Reino</b>	<b>Plantae</b>
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Subclase	Asteridae
Orden	Solanales
Familia	Solanaceae
Genero	Solanum
Especie	<i>Solanum Lycopersicum</i> L.

**Fuente:** [http://es.wikipedia.org/wiki/Solanum\\_lycopersicum](http://es.wikipedia.org/wiki/Solanum_lycopersicum), Revisado el 14 de Enero de 2015

### **Producción de plántula y trasplante.**

La producción de plántula es una labor que requiere de diversos cuidados ya que la calidad del cultivo estará en función de esta actividad. Las consideraciones generales que se deben tomar en cuenta se relacionan con el tipo de sustrato, siembra en charolas, variedad de semilla, y cuidados generales.

La semilla debe tener un buen porcentaje de germinación (más de 90%), que produzcan plantas vigorosas; por lo general se siembra en charolas de 200 cavidades ya que así se puede tener un mejor control del desarrollo de la planta y de patógenos. El sustrato usado debe proporcionar buena estructura para el cepellón además de aireación para el sistema radical, debe ser inerte de tal forma que también se pueda tener control sobre la nutrición y libre de agentes contaminantes.

La semilla se coloca en las charolas una por cavidad a una profundidad de 2 a 3 mm, regadas con agua de bajo contenido de sales y pH adecuado, en el agua de riego se pueden aplicar fertilizantes con micronutrientes, fungicidas o en caso de ser necesario enraizadores para asegurar mayor producción de raíz.

Para obtener plántulas de calidad las condiciones y cuidados climáticas influyen de manera determinante, la temperatura debe oscilar entre 25 y 30°C y no descender a menos de 18°C y humedad relativa mayor a 80%, la luz es un factor importante ya que en el momento de emergencia de las plántulas tienden a dirigirse hacia la luz lo que provoca que se alarguen lo cual puede ser causa de que se puedan romper.

Las plántulas de jitomate están listas para trasplantar cuando tienen aproximadamente 15cm de altura, en este caso el sustrato en el que se colocara el cultivo debe tener buen contenido de humedad y estar desinfectado. A partir del trasplante se comienzan a realizar labores culturales.

Las labores propias de manejo de un cultivo establecido se refieren principalmente a cuestiones nutricionales, de riego y tipo de cultivo ya sea determinado o indeterminado. Las plantas indeterminadas se van podando constantemente para dejar solo uno o dos tallos principales, también puede considerarse la poda del tallo hasta un número determinado de racimos (poda terminal) y el raleo de frutos pequeños.

Es también importante el monitoreo de la presencia de plagas y enfermedades para tomar medidas en caso de presentarse y realizar o procurar la polinización para una mejor calidad del fruto. El riego es un factor importante ya que tanto el exceso como la falta de agua pueden limitar la producción.

## **Nutrición**

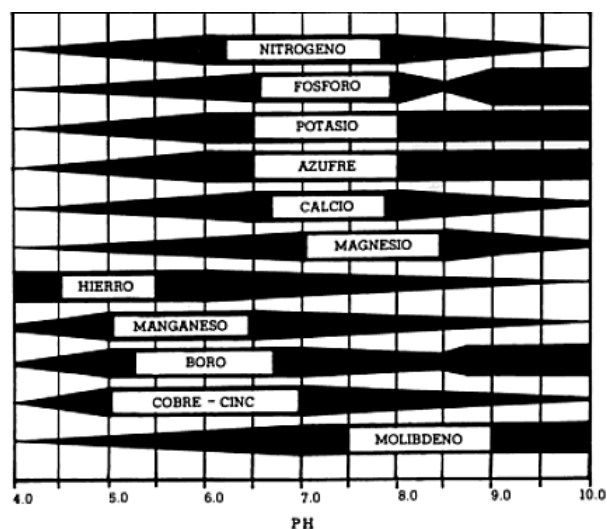
La nutrición de un cultivo es de los aspectos más importantes ya que, aunque más del 90% de la materia de las plantas está compuesta por carbono, hidrogeno y oxígeno los cuales se obtienen del aire y del agua, son necesarios más elementos que deben ser aportados vía radical por ser esenciales para las plantas y cuya deficiencia podría provocar que la planta no complete sus etapas de desarrollo (Alarcón, 2000).

En cuanto a la producción de Jitomate, la mayoría de elementos esenciales se proveen mediante la solución nutritiva en la cual debe haber un balance de nutrientes (Juárez *et al.* 2006); en este caso, para la preparación de la solución nutritiva deberá prepararse cuidando factores como pH (5.5-6), temperatura próxima a 22°C, y conductividad determinada de acuerdo al contenido de nutrientes (Lara, 1999), o en otros casos solo se requiere de la aplicación de agua cuando el cultivo se desarrolla en un medio que aporta nutrientes como las compostas (De la cruz *et al.* 2009).

Steiner (1961), estudiando la forma de preparar soluciones nutritivas para los cultivos indica que los factores más importantes a tomar en cuenta son la proporción de elementos

como cationes y aniones, el pH, y la concentración total de nutrientes, y dado que los elementos que se agregan a la solución en diferentes cantidades es necesario tomar en cuenta su grado de solubilidad, con la finalidad de garantizar que los elementos estén disponibles para las plantas.

En la figura 2 se muestra la relación entre el pH de un medio como el del sistema radical, y la disponibilidad que presentan los elementos nutritivos. Debido a que la solución nutritiva se agrega en el sistema radical los elementos químicos se encontrarán más disponibles cuando el sistema radical se encuentra en un medio con suficiente humedad ya que el agua es el medio de absorción de nutrientes en la raíz.



**Figura 2. Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Núñez, 2000).**

Aunque la nutrición del cultivo de jitomate requiere de diferentes elementos químicos se hace más hincapié en que los elementos potasio ( $K^+$ ) y calcio ( $Ca^{2+}$ ) deberán agregarse en suficiente cantidad ya que su disponibilidad y absorción en las plantas puede significar mayor calidad y producción. Los frutos de Jitomate presentan diferentes concentraciones de calcio dependiendo de la fuente de obtención de nutrientes, ya sea de una solución nutritiva o a partir de abonos naturales (Premuzic *et al.* 1998), sin embargo el balance de nutrientes es importante para lograr una adecuada absorción.

### **El potasio.**

El potasio  $K^+$ , es un elemento que se encuentra en las vacuolas de las células y no es constituyente estructural de las plantas, la falta de potasio en plantas provoca la caída de hojas y malformaciones en frutos (Pérez y castro, 2012).

El potasio, en las plantas de Jitomate tiene la función de síntesis de proteínas, como elemento esencial en procesos de fotosíntesis, además, la disponibilidad de potasio contribuye al transporte de nutrientes de las hojas al fruto, el rendimiento de un cultivo de Jitomate se ve afectado con bajas cantidades de potasio y da como resultado frutos con bajo contenido de sólidos solubles totales.

A nivel celular, el potasio participa en el movimiento del estoma, órgano con el cual la planta intercambia agua y gases con la atmosfera. Cuando la planta se encuentra ante algún tipo de estrés ya sea debido a la salinidad o por falta de agua el potasio ayuda a mantener la turgencia de las hojas por lo que puede haber más eficiencia en el uso del agua.

En cuanto a la producción de fruto el potasio participa en la síntesis de licopeno que da el color rojo al Jitomate, además, la disponibilidad de potasio proporciona firmeza en frutos (Gallegos, 2012).

### **El calcio.**

El calcio es fundamental en la pared celular y estructura de la planta. Hay un alto porcentaje de calcio en las paredes de la célula funcionando como factor de cohesión entre ellas. Este elemento se caracteriza por mantener las células juntas y garantizar su estructura, cuando el calcio es deficiente se detiene o minimiza el desarrollo de las raíces y nuevos brotes ya que participa en procesos de división celular. En el caso de plántulas de Jitomate, se ha determinado que la concentración de calcio incrementa la producción de materia vegetal de las raíces, además de que los demás órganos de la plántula no presentan deficiencias de este elemento (Villegas *et al.* 2005).

La consistencia de los frutos depende de la disponibilidad de calcio, la durabilidad de las hojas en la planta es más alta con contenidos altos de calcio. La concentración de calcio en la planta le proporciona resistencia contra patógenos al tener la célula más firmeza y da resistencia a la fruta tras la manipulación y almacenaje.

El calcio es un elemento que se transporta en su mayor parte mediante el flujo de la transpiración por el xilema, debido a su poca movilidad dentro de la planta, si el cultivo tiene tasas bajas de transpiración tendrán poco calcio, lo cual provoca la presencia de necrosis en el extremo apical de la fruta (Blossom End Root).

El riesgo de desarrollo de Blossom end root (BER) se acentúa con condiciones climáticas como la sequía o la poca disponibilidad de agua en las etapas de desarrollo vegetal y fructificación, además, la alta salinidad en la solución nutritiva o agua de riego también son un factor que puede ocasionar necrosis apical en frutos de Jitomate.

Los elementos potasio y calcio pueden proporcionar mayor calidad poscosecha en otras especies como lo determino Ramírez *et al.* (2010) en un cultivo de Tulipán en el que encontró que la vida de florero de esta especie se ven influenciados por la relación en el contenido de  $K^+$  aplicados como fertilizantes. Por otra parte, para disminuir el riesgo de aparición de BER en Jitomate, es conveniente la aplicación de aspersiones foliares de calcio (Gómez, 2012) ya que con esta actividad se permite que los frutos contengan los requerimientos mínimos de  $Ca^{2+}$  y por lo tanto mejoren su calidad comercial.



## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1. Ubicación

La presente investigación se llevó a cabo en el invernadero del Postgrado de Botánica del Colegio de Postgraduados (Figura 3) Campus Montecillo, México, con una altitud de 2250msnm y coordenadas 19°21´ latitud Norte y 98°54´ longitud Oeste en el periodo del 06 de Mayo de 2014 al 28 de Julio de 2014.



**Figura 3.** Invernadero para el experimento.

El invernadero está provisto de tres túneles y para este experimento se utilizó el túnel central, el cual se desinfecto para prevenir infecciones en el cultivo usando hipoclorito de sodio en proporcion de 1mL por litro de agua, esta misma actividad se llevó a cabo en los tinacos para la solucion nutritiva y sistema de riego. El lugar de trabajo estuvo provisto de un tinaco de agua con capacidad de 4000L, filtros de discos, control de riego con electrovalvulas, bomba de 1HP, Ademas contó con una cubierta blanca en el suelo (Ground cover), mallas antiafidos laterales y cenital y cortinas plásticas con sistema de elevacion manual con malacate.

## **5.2. Sustrato.**

Para llevar a cabo el experimento se utilizó Tezontle rojo (roca volcánica) como sustrato, el cual se analizó para determinar sus propiedades físicas, el análisis se llevó a cabo en los laboratorios de física de suelos del Posgrado de Edafología en el Colegio de Postgraduados.

### **Porosidad y densidad aparente.**

El procedimiento para determinar la porosidad y densidad aparente fue el siguiente: se tomaron dos muestras de sustrato con un volumen de 1/2 litro ( $V_p$ ), se saturaron con agua y se pesaron ( $P_{s.sat}$ ), posteriormente se drenaron y se volvieron a pesar ( $P_{s.d}$ ), finalmente se secaron al horno y se volvieron a pesar las muestras ( $P_{s. Seco}$ ), las características de porosidad se determinaron mediante las siguientes relaciones: Volumen de aireación ( $V_{ai}$ )= peso del suelo saturado menos el peso del suelo drenado, Volumen total de poros ( $V_{tp}$ )=peso del suelo saturado menos el peso del suelo seco, Porosidad total (%) =volumen total de poros entre el volumen de la muestra, en este caso el volumen de la muestra fue de 500mL, porosidad de aireación es el volumen de aireación entre el volumen de la muestra multiplicado por un factor de 100 y la porosidad de retención de humedad como la diferencia entre la porosidad total y la porosidad de aireación.

### **Densidad aparente**

Para determinar la densidad aparente se tomó una muestra de tezontle con un volumen de  $8 \text{ dm}^3$  la cual se colocó en estufa de secado a  $105^\circ\text{C}$  por 24 horas, posteriormente esta muestra fue pesada, el valor obtenido fue de 10.190 kg. De esta manera se pudo determinar el valor de la densidad aparente, mediante la división de la masa del suelo seco entre el volumen total, para este caso el valor obtenido fue el siguiente,  $D_{ap} = 10190\text{g}/8000\text{cm}^3 = 1.27\text{g cm}^{-3}$

### **Densidad real.**

Para la determinación de la densidad real se llevó a cabo el siguiente procedimiento: se tomó una muestra de aproximadamente 50g de sustrato secado al horno el cual se introdujo en un matraz aforado, se determinó por separado el peso del matraz y de la muestra, a continuación se le agregó agua para cubrir por completo el sustrato, posteriormente se llevaron los matraces a una bomba de vacío en la cual se extrajo el aire de los poros del material, una vez hecho esto se aforó con agua hervida y se pesó. La finalidad de este procedimiento fue encontrar el volumen del tezontle sin que pudiera influir la porosidad.

### **CE y pH.**

Se determinó el pH y la conductividad del sustrato para lo cual se colocaron 20 gramos de suelo en un vaso de precipitados y se agregaron 40ml de agua destilada, se agitó la muestra y se dejó reposar por tres horas, posteriormente se determinó el pH y la conductividad.

### **Curva de liberación de agua.**

Se llevó a cabo la determinación de la curva de liberación de agua del sustrato, para lo cual se tomaron tres muestras del mismo, y se colocaron en vasos con una estructura porosa en el fondo que permite el paso del agua, y debajo de ella un embudo mediante el cual se puede generar succión. El embudo estuvo provisto de mangueras de caucho y graduaciones cada 10cm para observar el nivel de agua para lo cual se colocaron debajo columnas de agua de 10, 50 y 100cm, por 24 horas hasta estabilizar el nivel posteriormente se tomó una muestra y se determinó su humedad gravimétrica.

## Granulometría y estabilidad de agregados.

Se determinó la granulometría del sustrato mediante el siguiente procedimiento: se tomó una muestra de 500 gramos y se colocó en los tamices ordenados de mayor a menor diámetro de malla de arriba hacia abajo. Posteriormente se sacudieron los tamices mecánicamente durante 3 minutos y al terminar se determinó el peso del material retenido por las diferentes mallas.

### 5.3. Calibración del TDR.

El modelo TDR usado para determinar la humedad en el experimento fue el sensor HH2 delta-T Type WET 2, Device Moisture Meter (Delta-T, 2007), la metodología con la cual se llevó a cabo la calibración fue la que se indica en el manual de usuario del dispositivo en el que se sugieren los siguientes pasos a seguir.

1. Colectar una muestra representativa de suelo sin dañarla, e insertar el sensor para medir su permisividad ( $\epsilon'_w$ ), pesar la muestra (PSH) y medir su volumen (V).
2. Después de secar en el horno y pesar la muestra (PSS) se mide otra vez la permisividad ( $\epsilon'_0$ ), entonces se resuelve la ecuación 4.

$$b_0 = \sqrt{\epsilon'_0} \quad (4)$$

El valor de  $b_0$  debe estar entre 1.0 y 2.5.

3. Calcular el contenido de agua en volumen ( $\theta_w$ ) con la siguiente formula.

$$\theta_w = \frac{(PSH - PSS)}{V} \quad (5)$$

4. Finalmente calcular el valor de  $b_1$  con la siguiente formula.

$$b_1 = \frac{\sqrt{\varepsilon'_w} - \sqrt{\varepsilon'_0}}{\theta_w} \quad (6)$$

Una vez calculados los valores de  $b_0$  y  $b_1$  se sustituyen en la fórmula que relaciona la permisividad con la humedad según el modelo del TDR.

$$\theta_v = \frac{(\sqrt{\varepsilon'_b} - b_0)}{b_1} \quad (7)$$

Para la calibración en tezontle se tomaron tres muestras en recipientes con un volumen promedio de 0.318 L., y contenido de agua en volumen de  $\Theta_w$  de 0.195 g L<sup>-1</sup>, las muestras dieron los siguientes resultados para la calibración  $\sqrt{\varepsilon'_w}=2.77$ ,  $\sqrt{\varepsilon'_0}=1.2$ , por lo que  $b_1=8.05$  y  $b_0=1.2$ , estos valores se introdujeron en el TDR y posteriormente se procedió a determinar la relación existente entre los valores proporcionados por el TDR y valores calculados de humedad gravimétrica en el sustrato.

El procedimiento fue el siguiente, a una muestra seca en estufa se le fue agregando agua y por cada cantidad de agua agregada se determinó la humedad gravimétrica  $\theta_g$ .

$$\theta_g = \frac{PSH - PSS}{PSS} (100) \quad (8)$$

Dónde: PSH= Peso del sustrato húmedo, PSS= Peso del sustrato seco.

Posteriormente estos valores se transformaron a valores de humedad volumétrica  $\theta_v$  mediante la siguiente relación.

$$\theta_v = \theta_g * Da \quad (9)$$

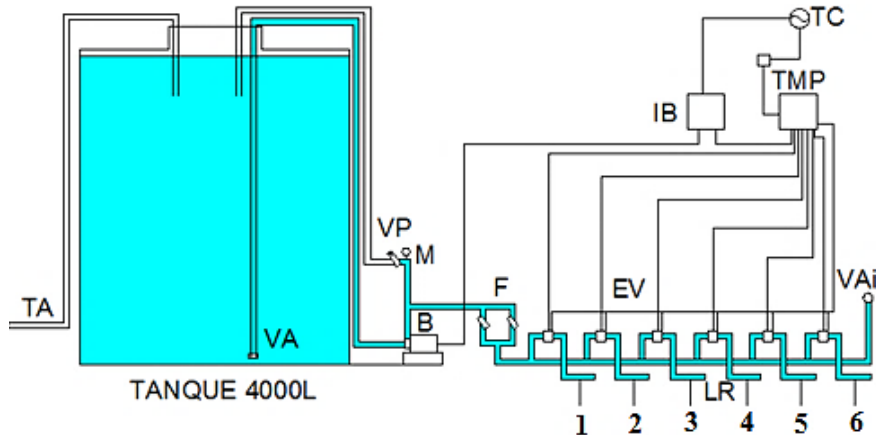
En la cual:  $Da$ = Densidad aparente (1.27 g cm<sup>-3</sup>)

#### 5.4. Sistema de riego.

Se utilizó el método de riego por goteo, con la finalidad de tener control sobre el agua aplicada a las plantas, el cabezal de riego estuvo integrado por los elementos que se muestran en la Figura 4, la tubería usada fue de PVC de 1 ½" cedula 40.

Para la instalación de las líneas de riego se realizaron pruebas de goteo a dos goteros diferentes para determinar cuál de ellos se adaptaría mejor a los requerimientos de riego. Las pruebas consistieron en colocar tubería de polietileno en una de las líneas regantes, y

determinar el gasto de los goteros a diferentes presiones con la finalidad de seleccionar los goteros con mejor sistema de compensación de la presión.



**Figura 4. Diagrama del cabezal de riego, TA: Toma de agua, VA: Válvula antiretorno, VP: Válvula de presurizado, M: Manómetro, B: Bomba, F: Filtros, EV: Electroválvulas, LR: Líneas regantes, Vai: Válvula de aire, IB: Interruptor de bomba, TMP: Temporizador, TC: Toma de corriente.**

### 5.5. Análisis de agua.

Se llevó a cabo el análisis del agua que se usó para la preparación de la solución nutritiva, los análisis se llevaron a cabo para determinar la existencia de la cantidad de aniones y cationes y realizar el balance de la solución nutritiva propuesta por Steiner (1984). los métodos utilizados fueron los siguientes, colorimétricos para  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , y  $\text{Cl}^-$ , los sulfatos se determinaron mediante absorbancia y para el caso de sodio y potasio el método utilizado fue la lectura directa en flamómetro.

Para los cálculos de fertilizantes se restaron los elementos presentes en el agua de los requerimientos en la fórmula de Steiner (1984), además se tomó en cuenta el contenido de bicarbonatos para neutralizar con ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y así evitar precipitaciones en el tinaco y posible taponamiento en goteros el pH calculado debe estar entre 5.5 y 6.5.

## **5.6. Producción de plántula.**

Para la investigación se usó semilla de Jitomate “El Cid”, una variedad tipo Saladette de crecimiento indeterminado, de madurez relativa temprana. Se sembraron 600 semillas, en charolas de 200 cavidades, en sustrato Peat moss.

Posterior a la siembra se cubrieron las semillas con papel para mantener la humedad, se estuvo humedeciendo hasta el momento de los primeros brotes de plántula, después se colocaron las charolas en una película de agua en agua con nutrimentos (solución nutritiva) y fungicida para evitar contaminaciones por hongos. Finalmente el trasplante se llevó a cabo el día 1 de Abril de 2014, cuando las plántulas presentaron la quinta hoja verdadera.

## **5.7. Manejo del experimento.**

Las plantas se condujeron a un solo tallo realizando podas de brotes laterales, el tutoreo se realizó con rafia tomatera atada desde la base del tallo de las plantas hasta la parrilla de tutoreo. Se colocaron trampas para insectos con la finalidad de disminuir la incidencia de plagas, la polinización se efectuó mediante el golpeo ligero en las líneas de tutoreo. Para mantener una humedad y temperatura adecuada se mantuvieron abiertas las ventilas cenitales del invernadero durante todo el experimento y las ventilas laterales durante el día. Se llevó a cabo la continua limpieza del tinaco de solución nutritiva y de la tubería, así como de los pasillos.

Para la determinación de pesos frescos y secos se utilizó una báscula electrónica con sensibilidad de 0.1g, las mediciones de área foliar se realizaron en un integrador de área foliar electrónico y el secado de las muestras se efectuó en estufas de secado a 70°C hasta peso constante.

El sistema radical del cultivo se analizó por capas en las bolsas del sustrato, la finalidad de este procedimiento fue estudiar el desarrollo radical ya sea en mayor o menor grado dependiendo de la humedad con la que disponga la planta.

Para diferenciar los tres estratos analizados se adoptaron las siguientes definiciones ES.0-7 para el estrato de la parte superficial de 0 a 7cm; ES.7-14 para el estrato intermedio de 7 a 14 cm y ES.14-21 para el estrato más profundo hasta los 21 cm.

Las detecciones de humedad con el TDR se realizaron en las tres capas de sustrato (Figura 5), y el riego se aplicó cuando el dispositivo marcó una lectura la que correspondiera con el nivel de humedad perteneciente al tratamiento.



**Figura 5.** División de las bolsas con sustrato en capas de igual profundidad para la detección de humedad con TDR en cada una.

### **5.8. Diseño experimental y tratamientos.**

El tezontle se colocó en bolsas de polietileno negro de 35 x 35 cm. Las bolsas se llenaron con un volumen de 8L, este volumen se determinó agregando 8 litros de agua a una bolsa para determinar la altura alcanzada, esa misma altura se usó para todas las bolsas, mismas que se rellenaron hasta esa altura en caso de compactación debido al manejo, el volumen igual en las bolsas permitió calcular el volumen de agua a aplicar.

Se colocaron las bolsas en el invernadero en arreglo tresbolillo, con una separación entre macetas de 40cm formando un triángulo equilátero, en cada línea se colocaron 90 plantas y en total en el área del experimento se colocaron 540 plantas.

La forma de trabajar fue la siguiente, las plantas se marcaron dentro del experimento para posteriormente tomarlas al azar durante los muestreos. La condición para que una planta fuera seleccionada es que se dejaran las plantas de su alrededor sin muestrear como se observa



en la Figura 6. La finalidad de esto es que las plantas se mantengan un régimen regular de evapotranspiración e incidencia de luz.



**Figura 6.** Fragmento de una línea de riego que indica la forma de seleccionar las plantas para muestreo, plantas para muestreo en color verde y plantas en color naranja no se muestrean.

Se utilizó un diseño experimental en arreglo completamente al azar con el factor de humedad distinto en cada tratamiento con 4 repeticiones. Los porcentajes de humedad de los tratamientos fueron 80% HAR (T1), 50% HAR (T2) y 30% HAR (T3)

Se asignaron los tratamientos de la siguiente manera, T1, T2, T3, y las repeticiones de los mismos T1R, T2R, T3R, estos tratamientos fueron asignados al azar en el invernadero quedando como se muestra en el Cuadro 5. Para cada tratamiento se asignaron 12 plantas por repetición las cuales se numeraron para llevar un control de podas y corte de fruto.

**Cuadro 5.** Asignación de tratamientos por línea de riego.

Línea	Tratamiento	Plantas
1	T1R	1-12
2	T2	13-24
3	T3R	25-36
4	T1	37-48
5	T2R	49-60
6	T3	61-72

En el presente experimento se trabajó con un sistema sin drenaje, es decir, el agua agregada al sustrato no debería drenar usándose en su totalidad para satisfacer las demandas de la planta, para lograr esto se tomó en cuenta el volumen de las macetas y el cálculo de la capacidad de campo del sustrato.

En el inicio de los tratamientos las macetas se llenan totalmente con agua para después drenarlas y dejarlas a un mismo nivel de humedad, en este caso los orificios practicados se dejaron descubiertos para observar algún posible derrame y en su caso proceder a corregir los

valores de humedad. La finalidad de este método es que se facilite la toma de lecturas de humedad con TDR.

### **Tratamientos.**

Para los diferentes niveles de humedad se determinó la capacidad de campo (CC) del sustrato con el siguiente procedimiento, se tomaron dos muestras de tezontle con un volumen definido y se secaron a 105°C por 24 horas; posteriormente se determinó su peso seco y se saturó con agua, la muestra se dejó drenando por dos días tiempo en el cual se registró un peso constante.

Con el peso del sustrato en húmedo (PSH) y en seco (PSS) se determinó la humedad gravimétrica, una vez hallado el valor de la humedad gravimétrica se transformó a valores de humedad volumétrica usando el valor de densidad aparente del suelo ya que las lecturas del TDR están dadas en base a volumen.

El promedio de humedad encontrado fue  $CC=19.11\%$  es decir, para un volumen de 8 L. cuyo peso seco es 10.190Kg se tienen retenidos 1.948 L. de agua cuando está a capacidad de campo. A partir de este valor se asignan los porcentajes de humedad para los tratamientos y los valores para detectar con TDR. En este caso, el valor de humedad aprovechable se tomó como la mitad del valor de la CC, de esta manera la humedad aprovechable residual es la que queda en el sustrato cuando la planta ha absorbido una cantidad de agua en un medio a capacidad de campo.

A partir de la capacidad de campo se determinaron los valores de humedad para los tratamientos.

Si  $CC=19.11\%$  y  $PMP=9.55\%$ ,  $HA=9.55\%$ .

80% HAR:  $9.55 (0.8) + 9.55 = 17.19\%H$

50% HAR:  $9.55 (0.5) + 9.55 = 14.32\%H$

30% HAR;  $9.55 (0.3) + 9.55 = 12.41\%H$

Para obtener los valores de las lecturas que se deben detectar con el TDR se transforman los valores de humedad gravimétrica anterior a valores de humedad volumétrica usando el valor de densidad aparente del sustrato de  $1.27g\ cm^{-3}$  los valores obtenidos son los siguientes:

$$80\% \text{ HAR} = 17.19\% \text{ H (1.27)} = 21.83\% \Theta_v$$

$$50\% \text{ HAR} = 14.32\% \text{ H (1.27)} = 18.18\% \Theta_v$$

$$30\% \text{ HAR} = 12.41\% \text{ H (1.27)} = 15.76\% \Theta_v$$

Usando primero un método gráfico se obtienen valores para introducir a la ecuación que relaciona la humedad volumétrica del TDR y del sustrato, después estos valores se corrigen hasta obtener el valor más aproximado.

$$\%H_{vol.cal.} = -0.0169(\%H_{vol.TDR})^2 + 1.915(\%H_{vol.TDR}) - 5.9606$$

$$21.83 = -0.0169(17.04)^2 + 1.915(17.04) - 5.9606$$

Para 80% HAR,  $\%H_{vol. TDR}=17.04$

$$18.18 = -0.0169(14.45)^2 + 1.915(14.45) - 5.9606$$

Para 50% HAR,  $\%H_{vol. TDR}=14.45$

$$15.76 = -0.0169(12.79)^2 + 1.915(12.79) - 5.9606$$

Para 30% HAR,  $\%H_{vol. TDR}=12.79$

Con los valores de HAR establecidos se obtiene el tiempo de riego determinando el contenido de agua que tendría que agregarse para llevar desde un porcentaje de HAR hasta capacidad de campo en el cual el contenido de agua en el sustrato es 1.948L, el peso total de las macetas es de 10190g, el caudal de los goteros es de  $34.5 \text{ mL min}^{-1}$  y se usa el valor de  $1 \text{ g mL}^{-1}$  para la densidad del agua.

Para 80% HAR se tienen  $0.1719 \text{ g}_{\text{agua}} \text{ g}^{-1}_{\text{suelo}}$

$$0.1719 \text{ g}_{\text{agua}} \text{ g}^{-1}_{\text{suelo}} (10190 \text{ g}_{\text{suelo}}) = 1751.66 \text{ g}_{\text{agua}} / (1 \text{ g mL}^{-1}) = 1751.66 \text{ mL.}$$

$$\text{Luego } 1948 \text{ mL} - 1751 \text{ mL} = 196.34 \text{ mL, } 196.34 \text{ mL} / 34.5 \text{ mL min}^{-1} = 5.69 \text{ min.}$$

Para 50% HAR se tienen  $0.1432 \text{ g}_{\text{agua}} \text{ g}^{-1}_{\text{suelo}}$

$$0.1432 \text{ g}_{\text{agua}} \text{ g}^{-1}_{\text{suelo}} (10190 \text{ g}_{\text{suelo}}) = 1419.208 \text{ g}_{\text{agua}} / (1 \text{ g mL}^{-1}) = 1419.208 \text{ mL.}$$

$$\text{Luego, } 1948 \text{ mL} - 1419.208 \text{ mL} = 528.792 \text{ mL, } 528.792 \text{ mL} / 34.5 \text{ mL min}^{-1} = 15.32 \text{ min.}$$

Para 30% HAR se tienen  $0.1241 \text{ g}_{\text{agua}} \text{ g}^{-1}_{\text{suelo}}$

$$0.1241 \text{ g}_{\text{agua}} \text{ g}^{-1}_{\text{suelo}} (10190 \text{ g}_{\text{suelo}}) = 1264.579 \text{ g}_{\text{agua}} / (1 \text{ g mL}^{-1}) = 1264.579 \text{ mL.}$$

$$\text{Luego, } 1948 \text{ mL} - 1264.579 \text{ mL} = 683.421 \text{ mL, } 683.421 \text{ mL} / 34.5 \text{ mL min}^{-1} = 19.80 \text{ min.}$$

En el Cuadro 6 se resumen los valores establecidos.

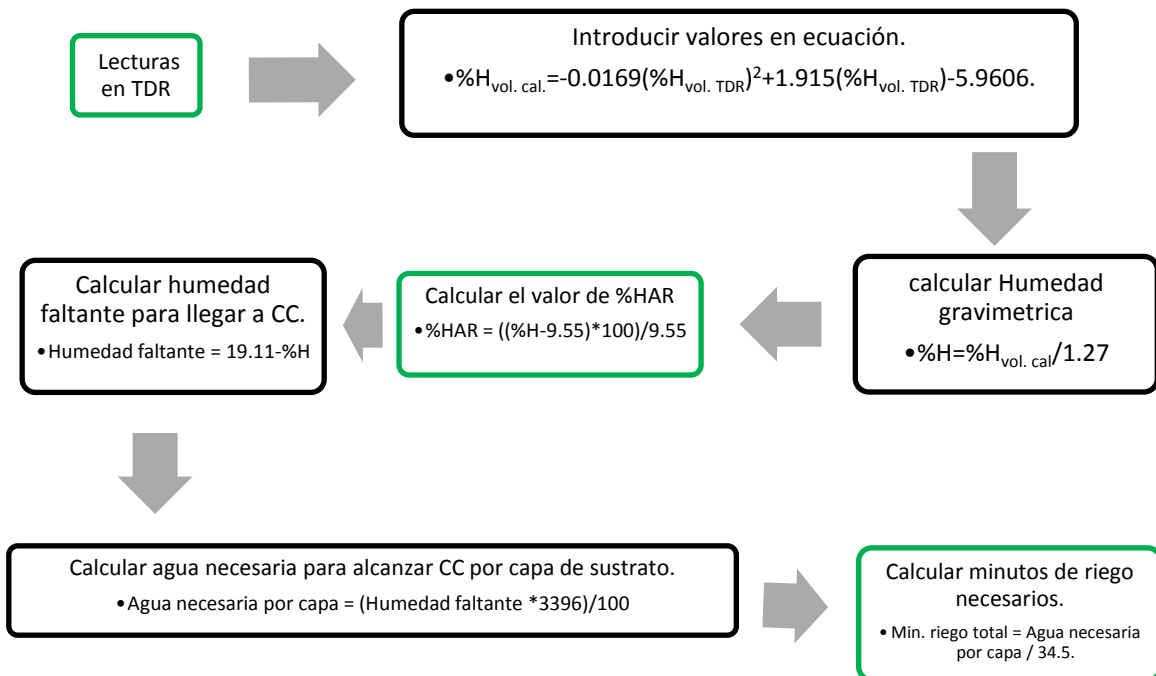
**Cuadro 6. Valores para detectar en TDR y minutos de riego a aplicar por porcentaje de humedad aprovechable residual aplicada.**

%HAR	Lectura en TDR	Minutos de riego
80	17.04	5.69
50	14.45	15.32
30	12.79	19.80

**%HAR=Porcentaje de humedad aprovechable residual.**

Para realizar un análisis de las diferencias en el sistema radical de las plantas se tomaron lecturas con el TDR en tres profundidades del sustrato colocando las varillas del sensor de forma horizontal, la suma del requerimiento de riego por capas se tomó como el riego total a aplicar, en este caso el peso de cada capa fue de 3.396Kg y su volumen 2.66L.

Dado que la única forma de saber la humedad del sustrato es introduciendo valores de lectura el TDR se diseñó un programa de riego en Excel<sup>®</sup> el cual proporciona el valor de humedad presente en cada capa de sustrato y por tratamiento, los requerimientos de riego por capa y totales, su secuencia se muestra en la Figura 7.



**Figura 7. Diagrama de flujo con las principales sentencias para programa de cálculo de porcentaje de humedad aprovechable residual y minutos de riego por capa de sustrato.**

Para la toma de lecturas con TDR se seleccionaron dos plantas por línea, en las cuales se fueron tomando lecturas durante el día y calculando su humedad, el riego se aplicó cuando se alcanzaba el porcentaje de humedad en el tratamiento, verificando el progreso de requerimiento de humedad en todo el experimento.

### **Variables evaluadas**

Para cada tratamiento se determinó la producción de materia fresca en raíz, tallo, hoja, flor, fruto y podas de brotes axilares, las muestras se secaron en estufa con ventilación forzada a 70°C hasta peso constante, los pesos se determinaron en una báscula con sensibilidad de 0.1g. y posteriormente se analizaron con el paquete estadístico SAS® Versión 9.0.

## **6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **6.1. Caracterización de los componentes del sistema**

#### **6.1.1. Agua y solución nutritiva.**

Los resultados del análisis de agua se muestran en el Cuadro 7, el pH obtenido fue de 6.99 lo cual indica que se trata de un agua neutra en la cual se puede generar fácil absorción de nutrientes por las plantas, en todo caso, la cantidad de Bicarbonatos presente se neutralizó adicionando ácido sulfúrico (2.2meq L<sup>-1</sup>) lo cual permite que el pH tenga un valor más bajo cercano a 6.5.

La conductividad eléctrica determinada fue de CE=0.34 dS m<sup>-1</sup>, el cual es un valor que está dentro de los parámetros químicos de buena calidad de agua para riego cuyos valores son 0 - 3dS m<sup>-1</sup>.

**Cuadro 7. Cationes y aniones presentes en el agua de riego utilizada en el experimento.**

Parámetro	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
	meq L <sup>-1</sup>						
Valor	0.8	0.1	1.2	0	0	0.1	3.2

La cantidad de iones presentes tampoco sobrepasa los valores establecidos para aguas de riego, en este caso, para la preparación de la solución nutritiva fue necesario adicionar mas iones en forma de fertilizantes para complementar las necesidades del cultivo de Jitomate.

Para obtener los valores de cationes y aniones recomendados por Steiner (1984), se realizó el balance para dos soluciones nutritivas, una de las cuales fue elaborada con una CE=1dS m<sup>-1</sup> equivalente a un potencial osmotico de -0.036MPa (Cuadro 8) para aplicar en el periodo 01/04/14 al 27/04/14 y otra con una conductividad electrica propuesta de CE=2dS m<sup>-1</sup> equivalente a un potencial osmotico de -0.072Mpa (Cuadro 9), esta para agregar hasta el la final del experimento. Las características de los ácidos son las siguientes: para H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, densidad= 1.84g mL<sup>-1</sup> y pureza de 98%, para H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> densidad de 1.7 g mL<sup>-1</sup> y pureza de 85%.

**Cuadro 8. Balance de fertilizantes para preparar la solución nutritiva con un potencial osmótico de -0.036 Mpa y conductividad eléctrica de 1.01dS m<sup>-1</sup>.**

	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>				
	meq L <sup>-1</sup>									
	Cationes			Aniones						
Steiner	4.5	3.5	2	6	0.5	3.5				
Análisis de agua	0.8	0.1	1.2	0	0	0.1				
Ajuste	3.7	3.4	0.8	6	0.5	3.4				
Fertilizantes							PM	PE	g 4m <sup>-3</sup>	
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	3.7			3.7			236.2	0.118	1747.88	
KNO <sub>3</sub>		2.3		2.3			101.11	0.101	930.21	
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O			0.8			0.8	246.51	0.123	394.42	
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		1.1				1.1	174.26	0.087	383.37	
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>						2	98.08	0.049	217.56mL	
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>					0.5		98	0.098	135.64mL	
Suministro	4.5	3.5	2	6	0.5	4				

PM=Peso molecular, PE=Peso equivalente (miliequivalentes)

**Cuadro 9. Balance de fertilizantes para preparar la solución nutritiva con un potencial osmótico de 0.072Mpa y conductividad eléctrica de 2.01dS m<sup>-1</sup>.**

	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>			
	meq L <sup>-1</sup>								
	Cationes			Aniones					
Steiner	9	7	4	12	1	7			
Análisis de agua	0.8	0.1	1.2	0	0	0.1			
Ajuste	8.2	6.9	2.8	12	1	6.9			
Fertilizantes							PM	PE	g 4m <sup>-3</sup>
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	8.2			8.2			236.2	0.118	3873.68
KNO <sub>3</sub>		3.8		3.8			101.11	0.101	1536.87
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O			2.8			2.8	246.51	0.123	1380.46
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		3.1				3.1	174.26	0.087	1080.41
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>						1.5	98.08	0.049	163.17 mL
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>					1		98	0.098	271.28 mL
Suministro	9	7	4	12	1	7.5			

PM=Peso molecular, PE=Peso equivalente (miliequivalentes),

Para complementar las necesidades de micronutrientes se realizó el balance de fertilizantes según las necesidades de elementos en partes por millón (Cuadro 10). Estas cantidades de elementos se agregaron cada vez que se preparó la solución nutritiva.

**Cuadro 10. Balance de microelementos para agregar a la solución nutritiva.**

	Mn <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	B			
	ppm							
	Pesos moleculares.							
Requerimiento	2.3	0.6	2	0.06	0.6			
Fertilizantes	54.94	65.37	55.85	63.57	10.81	PM	g m <sup>-3</sup>	g 4m <sup>-3</sup>
Sulfato de Manganeseo	Mn SO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O	2.3				169.02	7.08	28.32
Sulfato de Zinc	Zn SO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O		0.6			287.57	2.64	10.56
Sulfato de Hierro	FeSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O			2		278.05	9.96	39.84
Sulfato de cobre	Cu SO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O				0.06	249.73	0.24	0.96
Ácido bórico	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>							
suministro	2.3	0.6	2	0.06	0.6	61.84	3.43	13.72

PM=Peso molecular.

La solución nutritiva Steiner (1984) ha sido usada en varios estudios ya que sus relaciones nutrimentales entre aniones y cationes, así como de su concentración permiten satisfacer los requerimientos nutrimentales de diversos cultivos; cuando en la solución nutritiva se tiene un potencial osmótico de  $-0.072\text{MPa}$  se pueden obtener frutos de Jitomate de mejor calidad y plantas de mayor crecimiento (Gallegos, 2012). Por otra parte Lara (1999), indica que los nutrimentos presentes en las soluciones nutritivas deben tener un balance adecuado y que su aplicación debe considerar las condiciones ambientales y fenología del cultivo ya que de ello depende un buen desarrollo del cultivo.

### 6.1.2. Propiedades físicas del sustrato

El tezontle analizado presentó las características que se muestran en el Cuadro 11, los mayores porcentajes de partículas presentaron con un diámetro menor de  $0.25\text{mm}$  y de  $0.5$  a  $1\text{mm}$  lo cual puede ser factor determinante para la retención de agua, ya que un sustrato fino puede retener más agua que un sustrato con mayor contenido de arena.

La granulometría de este material puede influir en la producción de cultivos, sin embargo para tratamientos con iguales condiciones de humedad del suelo y aplicación de riegos la granulometría del tezontle no afecta la producción (San Martín *et al.*, 2012).

A partir de lo anterior se deduce que la aplicación de riegos en mayor o menor cantidad afecta el crecimiento de las plantas debido a que el tezontle, es un sustrato que tiene poca capacidad para retener el agua.

**Cuadro 11. Peso y porcentaje de residuos para cada tamiz en análisis granulométrico de tezontle.**

Tamiz (mm).	Peso muestra (g)	%
>6.36	1.2	0.24
4.76-6.36	1.3	0.26
3.36-4.76	24.2	4.84
2.0-3.36	60.6	12.12
1.0-2.0	80.7	16.14
0.5-1.0	143.6	28.72
0.25-0.5	7.8	1.56
<0.25	180.6	36.12
Total	500	100%



**Cuadro 12. Propiedades físicas del tezontle usado en el experimento para un volumen de muestra de 500ml.**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Densidad aparente (Dap)	1.27g cm <sup>-3</sup>
Densidad real (Dr)	2.73g cm <sup>-3</sup>
CE	0.045dS m <sup>-1</sup>
pH	8.57
Volumen de aireacion	49.8cm <sup>3</sup>
Volumen total de poros	236.35cm <sup>3</sup>
Porosidad total	47.27%
Porosidad de aireacion	9.96%
Porosidad de retencion de humedad	37.31%

Las características físicas del tezontle se muestran en el Cuadro 12, el extracto saturado de este material presentó poca conductividad eléctrica (0.045dS m<sup>-1</sup>) por lo que puede considerarse con pocas posibilidades de aportar nutrientes al cultivo por sí mismo. Adicionalmente, el pH presenta un valor elevado, cuyo valor es de 8.57, sin embargo, la preparación de la solución nutritiva contempló la adición de ácido sulfúrico para disminuir el pH en el sustrato hasta valores próximos a 6.

### **6.1.3. Curva de liberación de agua.**

La curva de liberacion de agua es una manera esquemática de observar la disponibilidad de agua que presenta el sustrato y el espacio poroso que tiene para proporcionar aire al sistema radical.

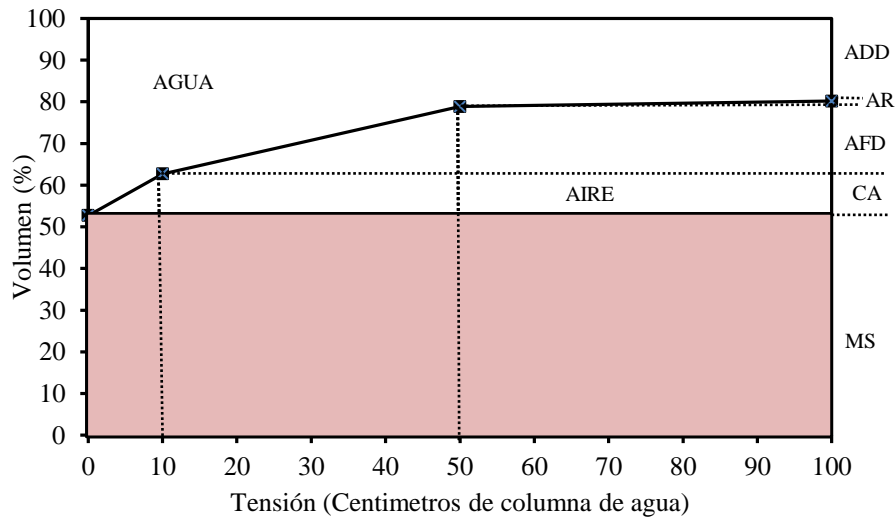
Para la presente investigación, se encontraron los valores que se muestran en el Cuadro 13, al contrastar estos valores con otros autores se observa que son similares por ejemplo Rodriguez *et al.* (2013) analizaron una muestra de tezontle en la cual encontraron valores parecidos a los encontrados en la presente investigacion (Porosidad total=55.5%, Porosidad de aireacion =12.33%), en este caso el valor del agua de reserva (AR) (1.32%) parece ser bajo sin embargo presenta semejanza con el valor encontrado Chamu (2010) en una muestra de tezontle quien encontró un valor de 2.2% de AR.

**Cuadro 13. Propiedades físicas del tezontle para la elaboración de la curva de liberación de agua.**

Parámetro	Valor
Porosidad total	47.27 %
Material sólido	52.73%
Porosidad de aireación	9.96%
AFD	16.17 %
AR	1.32 %
ADD	19.80 %

AFD= Agua fácilmente disponible, AR= Agua de reserva, ADD= Agua difícilmente disponible.

En la gráfica de la Figura 8 se observa que el tezontle utilizado en la presente investigación presenta valores altos de material sólido, es decir en una muestra por ejemplo de una maceta el 52.73% del espacio estará ocupado por partículas sólidas, en cambio el agua fácilmente disponible para las plantas ocuparía un espacio de 16.17%, en el cual las plantas encontrarán agua con mayor facilidad.



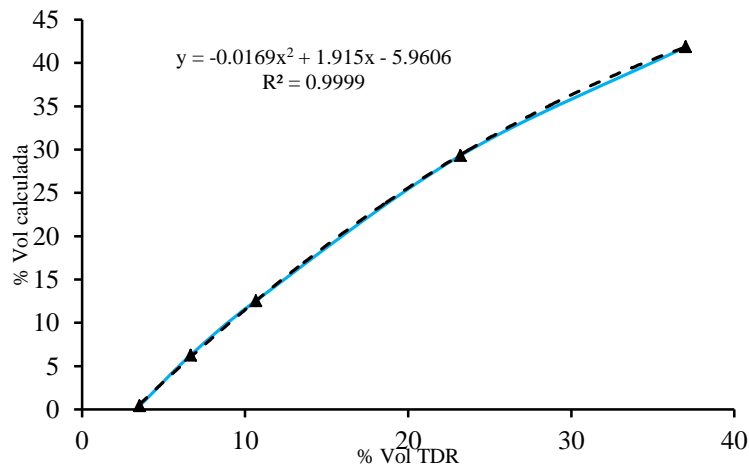
**Figura 8. Curva de liberación de humedad del sustrato usado en el experimento, MS=Material sólido, CA=Capacidad de aireación, AFD= Agua fácilmente disponible, AR= Agua de reserva, ADD= Agua difícilmente disponible.**

El tezontle evaluado presenta mayor espacio poroso en el cual se pueden adherir las moléculas de agua para mantener la humedad ya que presenta un alto valor de partículas de hasta 0.5 y 1mm de diametro, la capacidad de retención de humedad aumenta con la disminución de las partículas (menores a 0.71mm) según lo muestra Vargas *et al.* (2008), en un estudio en el cual determinaron las propiedades físicas de varias muestras de tezontle.

Por otra parte, Hernández *et al.* (2005) compararon las propiedades del tezontle con las de la perlita encontrando que en el tezontle hubo mas producción de fruto ya que la perlita presentó mas retención de agua produciendo anegación en el sustrato

#### 6.1.4. Calibración del TDR.

En la Figura 9, se muestran los resultados de la calibración del TDR, las lecturas que presentó el aparato se presentan como %Vol TDR ( $\theta_{VTDR}$ ) y el valor de humedad en sustrato como %Vol calculada ( $\theta_v$ ), la relación entre ambos valores se aproximó con una línea de tendencia cuya ecuación se muestra en la gráfica con un excelente ajuste (0.9999), lo cual permite que las determinaciones tengan un valor muy aproximado al real para el sustrato.



**Figura 9. Relación entre la humedad detectada con TDR y la humedad calculada en el sustrato, ambas en función del volumen.**

En esta investigación se obtuvo un ajuste mas parecido a una curva en la cual la ecuación es  $\theta_v = -0.0169 (\theta_{VTDR})^2 + 1.915(\theta_{VTDR}) - 5.9606$ , en tanto que otros autores han encontrado relaciones lineales como Insunza *et al.* (2012), quienes encontraron la siguiente ecuación  $\theta_g = 0.062 + 0.94 \theta_{TDR}$ , durante la calibración de un TDR marca IMKO®, para determinar humedad en un suelo natural concluyendo que con esta ecuación se estimó con buena precisión el contenido de humedad del suelo.

Rojas (2009), realizando la calibración de un equipo TDR el cual tenía dos varillas de detección en un sustrato de tezontle encontró la siguiente ecuación  $y = -5192x^2 + 8862.8x -$

3687.3 con  $R^2=0.9654$ , en la cual “y” representa el valor de la humedad del sustrato, como se observa, esta es una relación que presenta un buen ajuste sin embargo el propio autor indica que para valores bajos de humedad (5-10%) se detectaron lecturas que no correspondían al valor de humedad presente en el sustrato.

### 6.1.5. Sistema de riego.

Los resultados de la evaluación a los goteros se muestran en las gráficas de la Figura 10, se observa que los goteros que presentaron mejor desempeño fueron los de la marca PLASTRO ®, en comparación con los goteros TORO ®, los criterios de selección de los goteros fueron los siguientes: el funcionamiento del mecanismo de compensación es decir que a medida que cambia la presión en el sistema de riego el gasto en el gotero no presentara altas variaciones de caudal, en el caso de los goteros TORO ® se observó un incremento del gasto al aumentar la presión a  $2.5 \text{ kg cm}^{-2}$  lo cual no ocurrió con los goteros PLASTRO ®, en los cuales el mecanismo de compensación presento buen funcionamiento entre 1 y  $2.5 \text{ kg cm}^{-2}$  y en este rango de presiones la variación en caudal fue mínima.

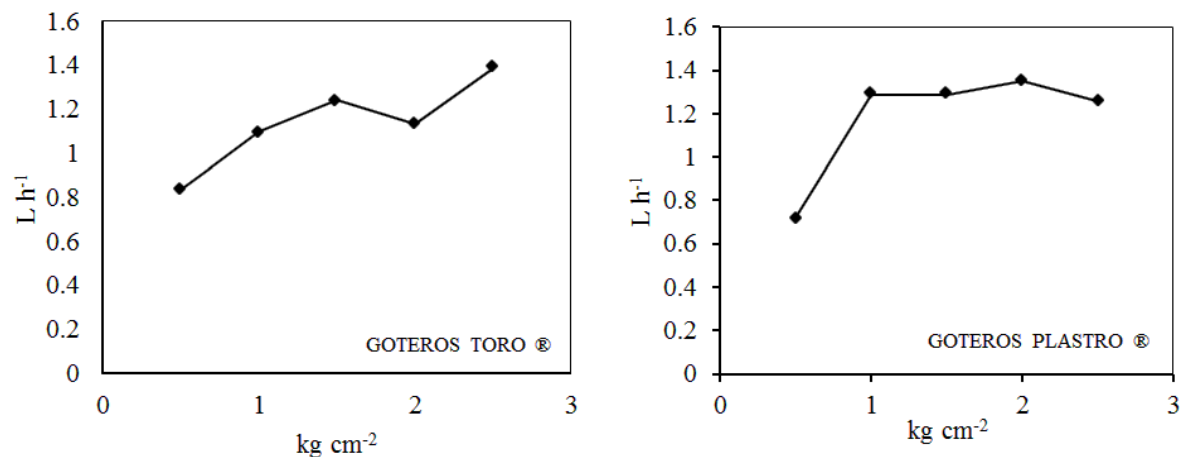


Figura 10. Gráficas que relacionan la presión en el sistema y el caudal entregado por los goteros evaluados.

El siguiente criterio para seleccionar el tipo de gotero a usar fue que no se registrara goteo a bajas presiones, esto con el fin de garantizar que al momento de regar no hubiera gasto extra después de que el sistema se apagara.

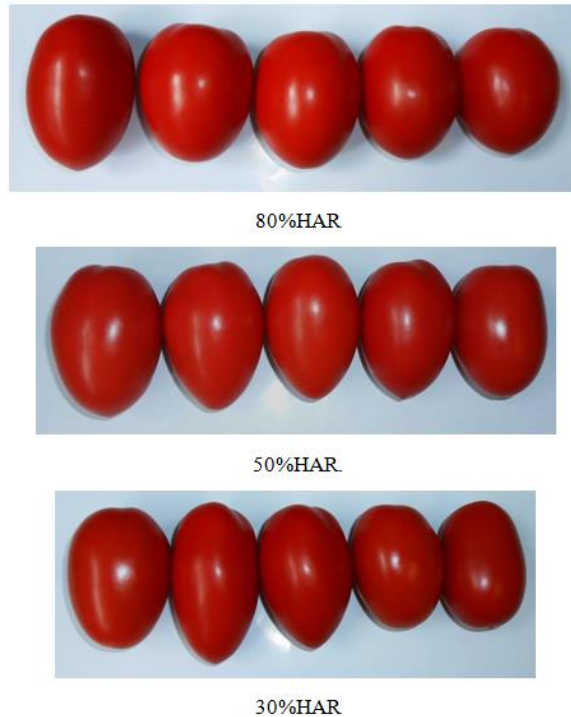
En el caso de los goteros TORO ® no tuvieron buen funcionamiento ya que a presiones de  $0.2\text{kg cm}^{-2}$  se registró un gasto de  $2.37\text{L h}^{-1}$ , en el caso de los goteros PLASTRO ®, no se presentó gasto a una presión de  $0.2\text{kg cm}^{-2}$  por lo cual se seleccionó este gotero para usar en el experimento.

## **6.2 Producción de Biomasa.**

### **6.2.1 Materia fresca y seca del fruto.**

Se llevó a cabo la toma de muestras de la producción de fruto, en este caso se contabilizó la producción total de frutos incluyendo frutos verdes y maduros, los muestreos realizados a los 63 y 84 días de experimento son los que incluyen frutos en estado de madurez. Al momento de realizar las cosechas se contabilizaron los frutos maduros y se determinó su materia fresca y seca para sumar estos valores al momento de hacer el muestreo, la Figura 11 muestra los frutos cosechados por tratamiento.

Como se puede observar, aunque se trata de una misma variedad de Jitomate la forma del mismo se afectó por la humedad aprovechable en el sustrato, las plantas pudieron haber tenido un mecanismo de respuesta generando sustancias las cuales tendieron a modificar la forma del fruto

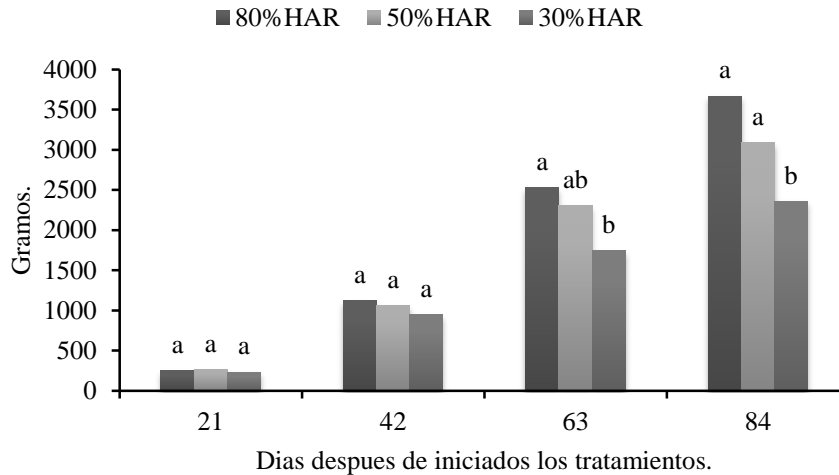


**Figura 11.** Calidad de frutos producidos por tratamiento en la segunda cosecha (60 días después de iniciados los tratamientos). 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual.

Las sustancias que pueden participar en la forma en que se desarrollan los frutos son el ácido giberélico que es responsable de la expansión celular y el ácido abscísico que se encuentra en el pericarpio del fruto (Casierra *et al.* 2007). En este caso, la presencia de tales sustancias pudo haber modificado la forma del fruto; el ácido abscísico es una sustancia que puede acumularse en las plantas con deficiencia de agua y su función en la planta es de alertar de un desequilibrio hídrico para el cierre de estomas (Bautista *et al.* 2010); en el tratamiento con 30 y 50% HAR la falta de agua pudo haber aumentado la cantidad de éstas sustancias y un efecto de ello es la modificación de la forma del fruto.

Los resultados de la materia fresca del fruto se muestran en la Figura 12, el análisis estadístico indica que hubo diferencias significativas en los muestreos realizados a los 63 y 84 días de tratamiento.

En general se observa que los tres tratamientos fueron aumentando su peso a lo largo del experimento, el tratamiento con 80% HAR fue el que tuvo más producción de fruto y el tratamiento de 30% HAR presentó los valores más bajos de producción.



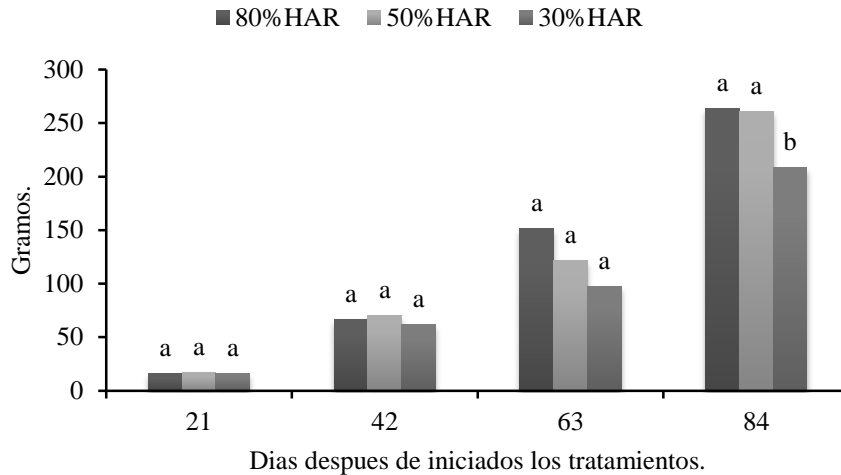
**Figura 12. Materia fresca del fruto tomada a lo largo del experimento, 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).**

En el muestreo que se realizó a los 63 días, el tratamiento con 30% HAR, presentó el peso más bajo de 1743.33g., seguido del tratamiento con 50% HAR el cual fue 32.44% más productivo con 2308.90g y el tratamiento con 80% HAR el cual fue, 45.4% más productivo con un peso de 2534.93 g.

En el muestreo realizado a los 84 días, el tratamiento con 30% HAR presentó el peso más bajo con 2360.6g. el tratamiento con 50% HAR tuvo 30.96% más peso con 3091.45g, y el tratamiento de 80% HAR 55.42% más productivo con 3668.88g. de fruto.

Las diferencias mostradas a los 63 y 84 días de tratamiento pueden deberse a las cosechas realizadas ya que en estas fechas se tuvieron frutos con madurez fisiológica y comercial los cuales se cortaron en diferente cantidad de acuerdo al tratamiento. En este experimento, se observó que en las primeras cosechas se obtuvieron más frutos maduros en el tratamiento con 30% HAR, lo cual podría indicar que en este tratamiento la falta de agua provocó que las plantas redujeran su periodo de producción de fruto maduro.

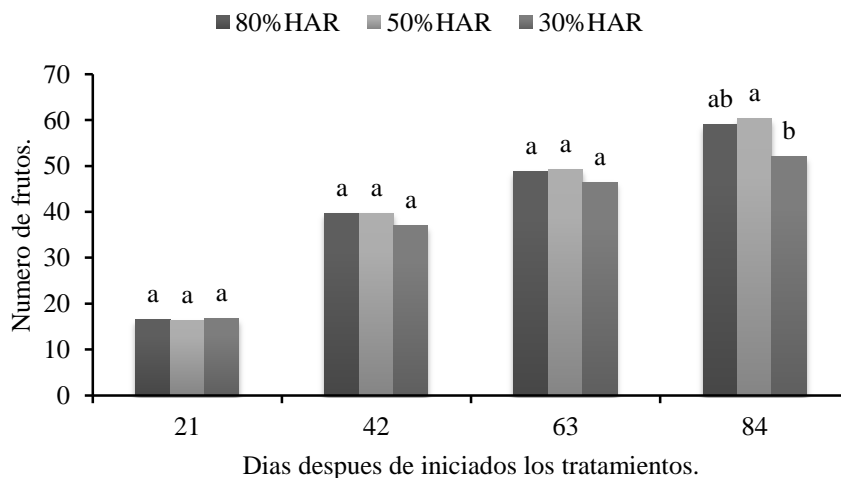
El análisis estadístico realizado a la producción de materia seca en frutos (Figura 13) arrojó diferencias significativas en el muestreo de los 84 días de experimento en el cual el tratamiento con 30% HAR tuvo menor materia seca.



**Figura 13.** Materia seca del fruto tomada a lo largo del tratamiento, 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

#### Número de frutos.

Se analizó el número de frutos producidos por tratamiento, en todos los casos se consideró el peso desde frutos recién formados y hasta frutos maduros. Solo se presentaron diferencias significativas a los 84 días de tratamiento (Figura 14)



**Figura 14.** Número de frutos tomados a lo largo del experimento, 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).



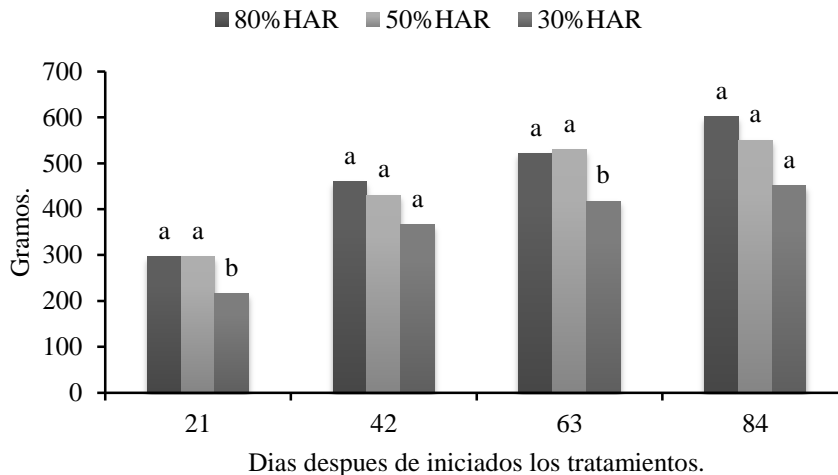
A los 84 días hubo diferencias entre los tratamientos con 30 y 50% HAR, el menor número de frutos se presentó en el tratamiento con 30% HAR (52 frutos) seguido del tratamiento con 80% HAR el cual tuvo 13.46% más fruto (59) y el tratamiento con 50% HAR 15.86% más fruto con un total de 60.25 Jitomates, lo cual indica que la disponibilidad de agua del sustrato incidió en la producción de fruto, la deficiencia de agua puede causar poca producción de fruto, además, como se observa en la Figura 11, la forma del fruto es afectada por la humedad del sustrato, los frutos tienden a ser más redondos con mayor humedad y a alargarse con la falta de agua.

En cuanto a la producción de fruto, Zarate (2007) encontró en un cultivo de Jitomate, la mayor producción de fruto total y número de racimos en las variedades que se mantuvieron creciendo en fibra de coco en comparación con los producidos en arena, a lo cual el autor explica que la fibra de coco posee más microporosidad que la arena y mayor capacidad de retener agua por lo que en comparación con arena las plantas con Jitomate tuvieron más humedad disponible.

Por otra parte, Rázuri *et al.* (2008) determinaron que la aplicación de láminas de riego con base en 80 y 100% de la evapotranspiración del tanque evaporímetro tipo “A”, se produce más fruto de Jitomate en comparación con láminas de agua aplicadas con base en 70 y 60%. Es por ello que la respuesta de las plantas a la poca disponibilidad de agua en el sustrato depende de la duración e intensidad del déficit hídrico.

### **6.2.2 Materia fresca y seca de la hoja.**

Se llevó a cabo el análisis de la producción de hoja por cada tratamiento, en este caso se tomaron datos de pesos frescos y secos, además, se determinó el área foliar con un integrador de área foliar (LI-COR, Inc. Lincoln, Nebraska, USA. Modelo LI-3100). En la Figura 15 se muestran los pesos frescos.

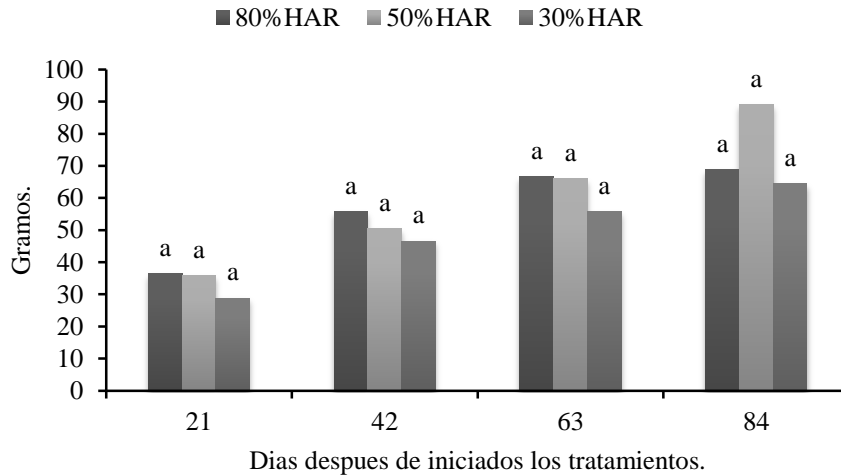


**Figura 15. Materia fresca de la hoja tomada a lo largo del tratamiento, 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).**

Las diferencias presentadas en el tratamiento con 30% HAR pudieron deberse al estrés causado debido a la poca disponibilidad de agua, y a la consecuente disminución de la turgencia foliar, como reporta Félix (2011), la oferta de agua en el suelo así como las características evaporativas de la atmósfera influyen en la turgencia de las hojas

Se observaron diferencias significativas a los 21 y 63 días de experimento, en los cuales el tratamiento con 30% HAR produjo menor peso en las hojas, en cambio, los tratamientos con 50% HAR y 80% HAR no presentaron diferencias estadísticas.

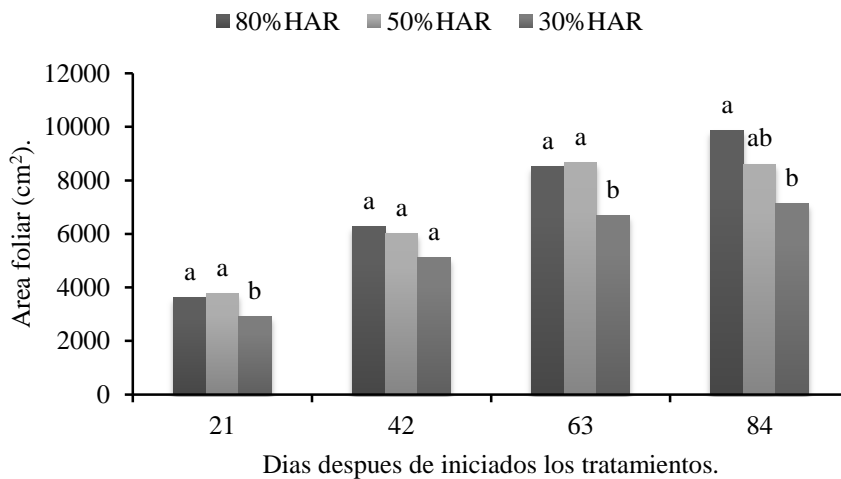
No se mostraron diferencias significativas en los pesos secos de la hoja como se muestra en la Figura 16, aunque el tratamiento que presentó los mayores pesos fue el que se mantuvo con 80% HAR, los pesos secos más bajos se registraron para el tratamiento con 30% HAR.



**Figura 16.** Materia seca de la hoja tomada a lo largo del tratamiento, 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

### Área foliar

Los resultados de área foliar se muestran en la Figura 17, en este caso el análisis estadístico mostró diferencias significativas, a los 21, 63 y 84 días de tratamiento siendo el tratamiento con 30% HAR el que más diferencias presentó contra los tratamientos con 50% HAR y 80% HAR.



**Figura 17.** Área foliar en plantas de Jitomate, 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

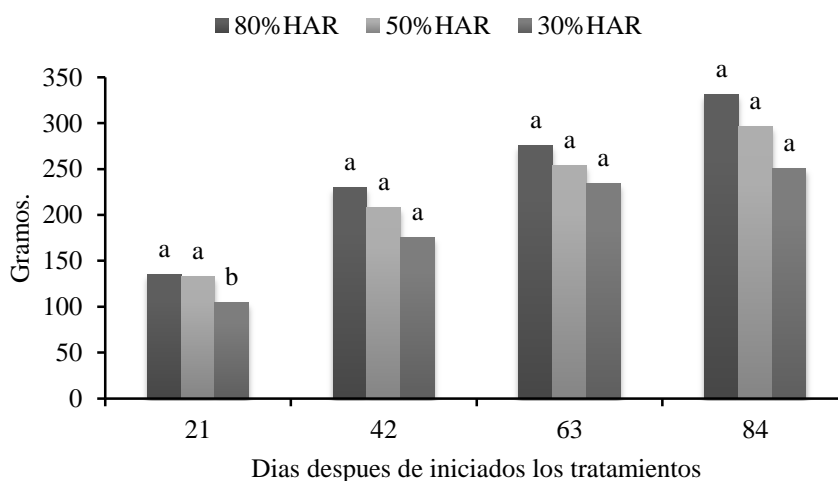
El tratamiento con 30% HAR presentó los valores más bajos de área foliar, a los 21, 63 y 84 días  $2901.25\text{cm}^2$ ,  $6676.41\text{cm}^2$  y  $7143.21\text{cm}^2$  respectivamente, en cambio, el tratamiento con 50% HAR presentó en estas fechas 29.47%, 29.55% y 20.52% más área foliar, y el tratamiento con 80% HAR 24.29%, 27.58%, 38.01% mayor área foliar a partir de lo cual se puede determinar que los tratamientos con 30 y 50% HAR tienden a ser semejantes mientras que el tratamiento con 80% HAR se diferencia produciendo cada vez más área foliar.

### 6.2.3 Materia fresca y seca del tallo

Se analizó la producción de materia fresca del tallo en plantas de Jitomate con diferente humedad aprovechable residual en el sustrato (Figura 18).

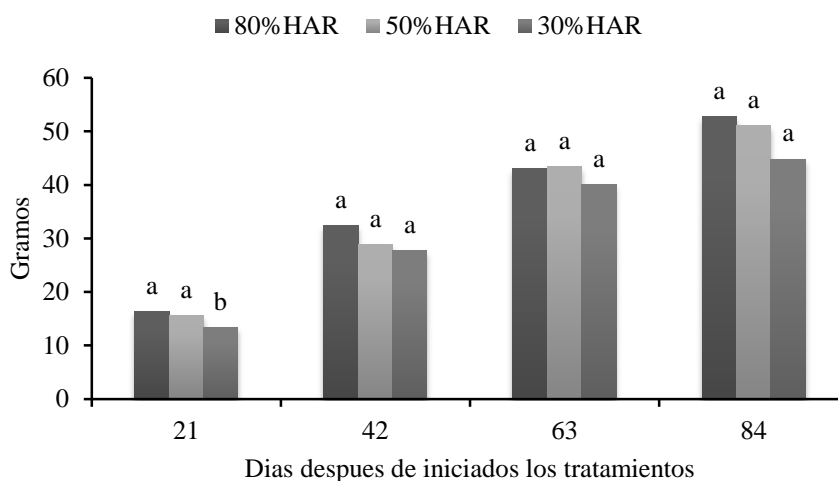
El análisis estadístico mostró que no hay diferencias significativas en la materia fresca del tallo para los muestreos de los 42, 63 y 84 días en cambio sí se presentaron diferencias significativas en los primeros 21 días de tratamiento en los cuales el tratamiento con 30% HAR presentó diferencia en pesos.

En todos los casos, el tratamiento que presentó los pesos más altos fue el de 80% HAR seguido del tratamiento con 50% HAR y finalmente el tratamiento con 30% HAR tuvo los pesos más bajos; en todos los casos el aumento de peso fue consistente.



**Figura 18.** Materia fresca del tallo tomada a lo largo del tratamiento, 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

El análisis de la materia seca del tallo (Figura 19), mostró que las diferencias significativas se presentaron solo a los 21 días de tratamiento, en este periodo el tratamiento con 30% HAR fue diferente presentando el peso más bajo (13.40g); en el mayor de los casos el tratamiento con 80% HAR presentó los valores más altos excepto en el muestreo de los 63 días, en el cual el tratamiento de 50% HAR mostró el peso más alto con 43.38g. En todos los casos el incremento en peso fue consistente.

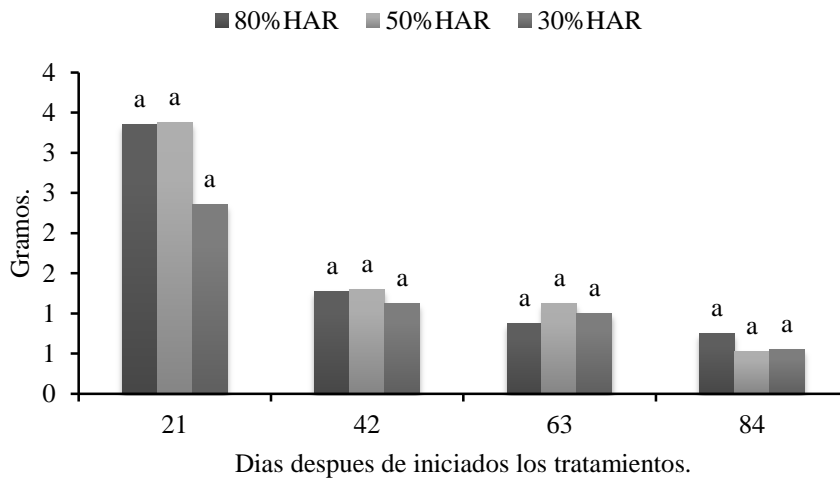


**Figura 19.** Materia seca del tallo tomada a lo largo del tratamiento, 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

En general, se observó que los niveles de humedad en el sustrato afectaron el crecimiento del tallo, en este experimento se observó que las plantas con el porcentaje de humedad residual de 80% presentaron los ejemplares con mayor altura en tanto que las plantas mantenidas con 30% HAR fueron más bajas, estos resultados concuerdan con otros autores como May *et al.* (2011), quienes determinaron que la altura del tallo y su diámetro en plantas de un cultivo de chile fueron mayores cuando se aplicó el 60% de humedad aprovechable. Por otra parte Pérez *et al.* (2011), determinaron que las plantas ornamentales mantenidas con mayor frecuencia de riego (más humedad disponible) presentaron más desarrollo del tallo tanto en altura como en diámetro.

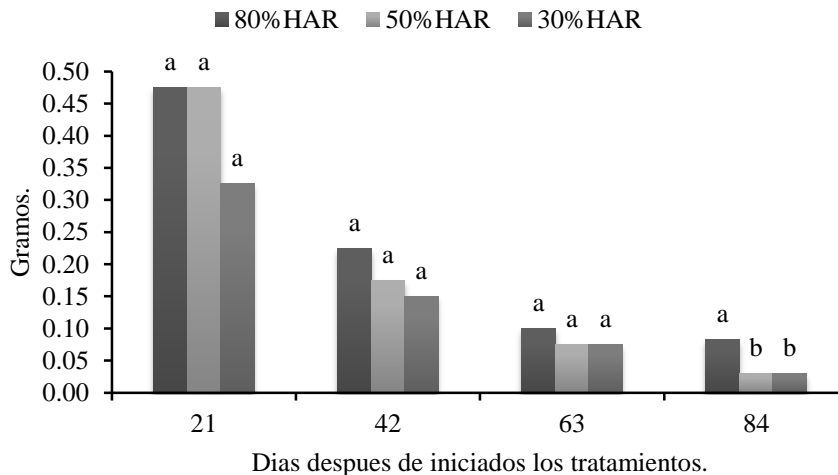
#### 6.2.4 Materia fresca y seca de la flor.

En el momento de los muestreos se fueron tomando datos de flor los cuales solo consideran el peso de la misma sin considerar el número de flores ni de racimos. En la Figura 20 se muestran los resultados en los cuales se observa que no hubo diferencias significativas con relación a la materia fresca de la flor además, a partir del inicio de tratamientos hubo una tendencia a la menor producción de flor en los tres tratamientos.



**Figura 20. Materia fresca de la flor, 80%HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50%HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30%HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).**

La disminución en la producción de flor en todos los casos puede deberse a que hasta los 21 días las plantas estuvieron en periodo de floración pero al llegar a los 42 días comenzaron a producir mayor cantidad de fruto (ver Figura 22) reduciendo en este caso las flores para muestreo. No se presentaron problemas de aborto de flores ni hubo presencia de plagas o enfermedades que pudieran afectar la floración. El análisis estadístico de los pesos secos de la flor mostrado en la Figura 21 indica que solo se presentaron diferencias significativas a los 84 días de tratamiento.



**Figura 21. Materia seca de la flor, 80%HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50%HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30%HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).**

A los 84 días, el tratamiento diferente fue el de 80%HAR el cual presentó un valor más alto de peso seco de la flor con 0.08g., los tratamientos con 50%HAR y 30%HAR fueron iguales con 0.03g., el cual es un peso 37.5% menor.

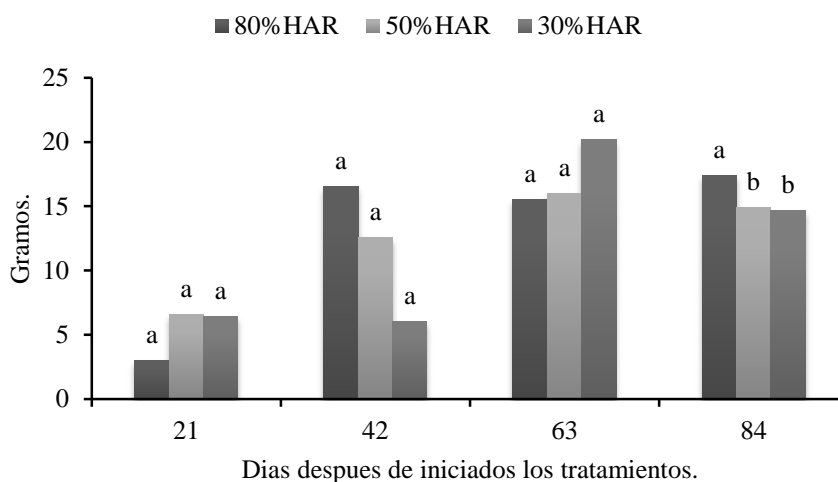
Los porcentajes de humedad manejados tuvieron efecto sobre la producción de flor ya que como se observa en la Figura 21, el tratamiento con 50%HAR aunque presenta disminución de materia seca en la flor en el mayor de los casos presenta valores más altos que los otros dos tratamientos.

García *et al.* (2004) en un estudio de déficit de humedad en el sustrato encontraron que al someter plantas de jitomate a suspensión de riego se presenta poca producción de yemas florales en plantas tratadas, además en este caso según la variedad tratada se puede presentar retraso en la aparición de flor. De lo cual se puede determinar que las plantas sometidas a estrés hídrico llegan a presentar menos producción de flor.

### 6.2.5 Materia fresca y seca de podas de brotes axilares.

Durante el experimento se fueron realizando podas a intervalos regulares según el desarrollo de la planta por tratamiento, las cuales consideraron el corte de brotes laterales con el fin de permitir que la planta creciera con un solo tallo.

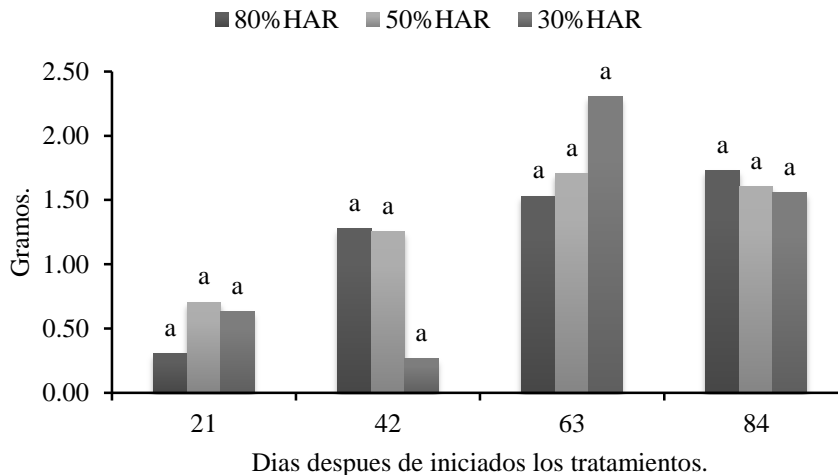
La forma de podar fue la siguiente, se fueron realizando cortes en las plantas seleccionadas para muestreo y se determinaron sus pesos frescos, los cuales se anotaron para acumularlos hasta el momento del muestreo y agregarlos a cada planta muestreada para determinar su peso seco, durante los muestreos las plantas se seleccionaron al azar por lo cual pudo presentarse más variabilidad en los datos. La Figura 22 muestra los resultados de la producción de materia fresca en podas, mostrando diferencias significativas solo a los 84 días de tratamiento.



**Figura 22. Materia fresca de podas de brotes axilares, 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).**

A los 84 días de experimento el tratamiento con 80% HAR fue significativamente mayor con un peso de 17.4g, en tanto que los tratamientos con 30% HAR (14.7g.) y 50% HAR (14.9g.), fueron iguales estadísticamente, 14.36% y 15.51% menores a 80% HAR respectivamente.





**Figura 23. Materia seca de podas de brotes axilares, 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).**

El análisis estadístico de la materia seca de podas de brotes axilares (Figura 23) no mostró diferencias significativas entre tratamientos en todos los muestreos. Al igual que para el caso de la materia fresca, la materia seca, fue muy variable debido a las frecuencias de corte y características de desarrollo de cada tratamiento.

### 6.2.6 Materia fresca y seca de la raíz.

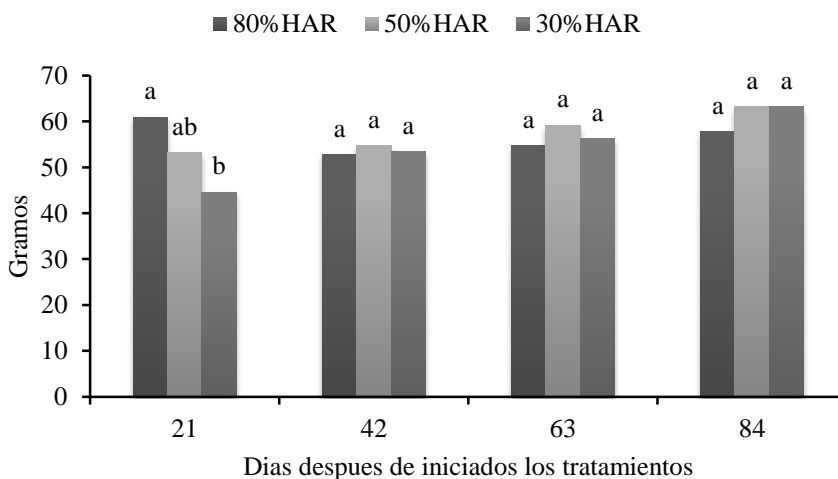
La raíz de las plantas es un órgano que se encuentra la mayor parte del tiempo bajo el suelo en cultivos agrícolas y al estar en contacto con el suelo y el agua, se genera el proceso de absorción tanto de esta como de nutrimentos. La absorción de agua depende de un proceso complejo en el que interactúan fenómenos físicos y químicos, la forma en que el agua fluye a través de las raíces puede ser a través de las células en una ruta simplástica o apoplástica a través de las paredes celulares, estas vías sin embargo no explicarían fenómenos de adaptación de las plantas al estrés hídrico o por salinidad, por lo cual Steudle (2000) estudió un modelo de flujo de agua en el que intervienen factores de conductividad hidráulica de las raíces y flujo radial de agua.

El agua es un elemento importante para el crecimiento de la raíz ya que proporciona la presión de turgencia para su elongación; en el suelo el crecimiento de las células estará restringido por lo que las raíces deben vencer los impedimentos mecánicos del suelo, en el

caso de suelos con poco contenido de agua el desarrollo radical está determinado por un proceso de ajuste osmótico en las células (Acevedo. 1979).

En la presente investigación se determinaron las diferencias en producción de biomasa en plantas de Jitomate al someterlas a diferentes porcentajes de humedad aprovechable residual en un sustrato de tezontle. Las raíces se estudiaron en tres capas de sustrato cada una de 7cm, el análisis estadístico se realizó por cada capa y niveles de humedad.

En la Figura 24, se observa que las diferencias significativas solo se presentan en los primeros 21 días de experimento siendo el tratamiento con 80% HAR el que obtuvo mayor valor con 36.61% más peso (61g) que el tratamiento con 30% HAR (44.65g), por su parte el tratamiento con 50% HAR presentó un 19.26% más peso (53.25g) que él de 30% HAR.

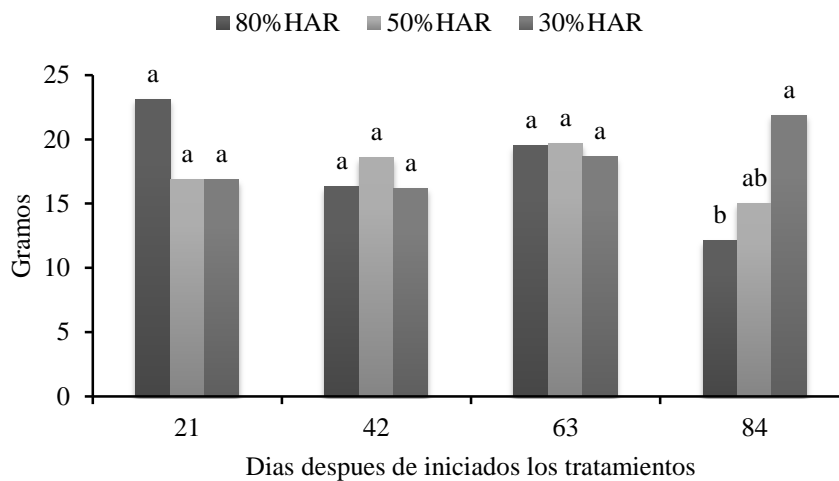


**Figura 24. Materia fresca de la raíz para la capa de sustrato perteneciente a una profundidad de 0 a 7 cm (ES. 0-7), 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).**

En los muestreos de los días 42, 63 y 84 los tres tratamientos presentaron incrementos en producción de biomasa pero sin diferencias significativas entre tratamientos, siendo el tratamiento con 50% HAR el que tuvo los valores más altos en los tres casos. A los 42 días de tratamiento 50% HAR presentó pesos 3.34% mayores que 80% HAR y 2.33% más que 30% HAR, a los 63 días, 8.43% mayores que 80% HAR y 5.18% mayores que 30% HAR; a los 84 días 9.57% más que 80% HAR y solo 0.18% más que 30% HAR.

El tratamiento con 80% HAR obtuvo los pesos más altos en el primer muestreo (61g) pero disminuyeron a partir del muestreo de los 42 días hasta 52.92g, esta característica puede deberse al crecimiento propio de la planta y a la maduración del sistema radical volviéndose más leñoso con el tiempo.

Los resultados de producción de biomasa fresca para la capa intermedia de sustrato (ES7-14) solo presentaron diferencias significativas en el muestreo de los 84 días de tratamiento (Figura 25).

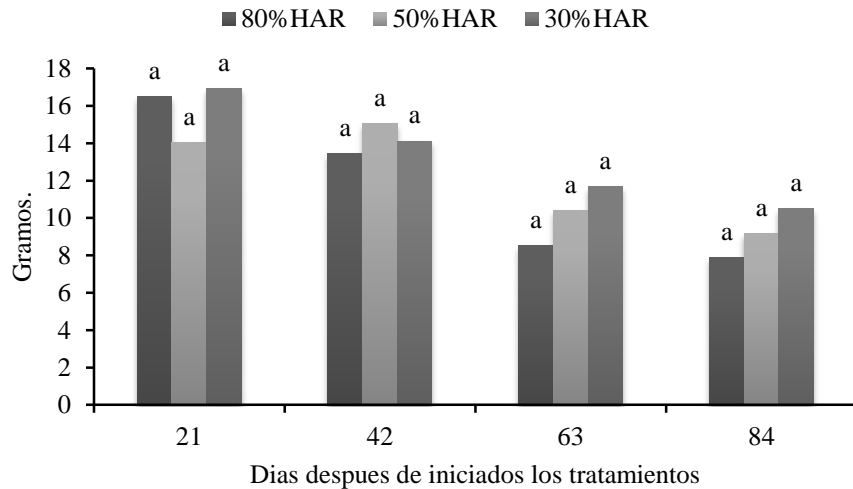


**Figura 25.** Materia fresca de la raíz para la capa de sustrato perteneciente a una profundidad de 7 a 14 cm (ES. 7-14), 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

En el muestreo de los 84 días de tratamiento las diferencias en peso son significativas, el tratamiento que registró más peso fue el que se mantuvo con 30% HAR con 21.87g, este peso es 45.41% mayor que el registrado con 50% HAR cuyo peso fue de 15.04g, la diferencia entre el tratamiento con 30% HAR y 80% HAR (12.13g) fue de 80.29%.

Para los tratamientos de 80% HAR y 50% HAR se aprecia una tendencia a la disminución de la cantidad de raíz producida, contrario al tratamiento con 30% HAR en el cual se va presentando más peso; En el muestreo de los 21 días los valores de pesos de raíz son iguales con 16.85g para 50% HAR y 30% HAR; en este caso, el tratamiento con 80% HAR fue un 37.24% mayor (23.12g), pero sin alcanzar una diferencia estadística significativa.

La producción de materia fresca en la capa más profunda del sustrato (ES 14-21) se muestra en la Figura 26, en este caso la tendencia general es la disminución de peso en raíz en el transcurso del tiempo durante el experimento sin encontrarse diferencias significativas.

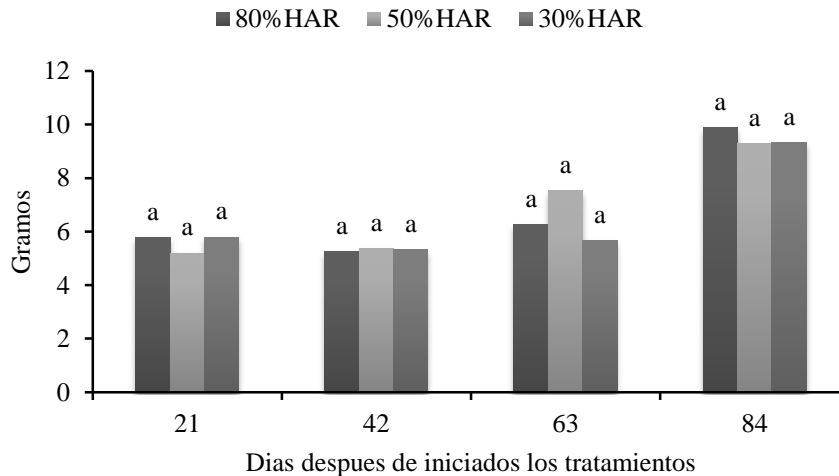


**Figura 26. Materia fresca de la raíz para la capa de sustrato perteneciente a una profundidad de 14 a 21 cm (ES. 14-21), 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).**

En este caso, el tratamiento que presentó los pesos más altos fue el que se mantuvo con 30% HAR; a los 21 días tuvo 16.95g, el cual es 2.65% mayor que con 80% HAR y 17.28% mayor que con 50% HAR; a los 42 días su peso fue de 14.12g el cual es 4.06% mayor que con 80% HAR pero 6.84% menor que con 50% HAR; a los 63 días tenía 11.7g lo cual es 12.67% mayor que para 50% HAR y 26.92% mayor que para 80%; finalmente a los 84 días, presentó un peso de 10.49g el cual es 12.67% mayor que el peso del tratamiento con 50% HAR y 24.59% mayor que para el tratamiento con 80% HAR.

Se determinó la materia seca de las muestras de raíz en cada uno de los estratos analizados, en la Figura 27 se muestran los valores para el estrato ES. 0-7. Se observa que la tendencia es al aumento de peso en todos los tratamientos sin presentarse diferencias significativas en ninguno de los casos.

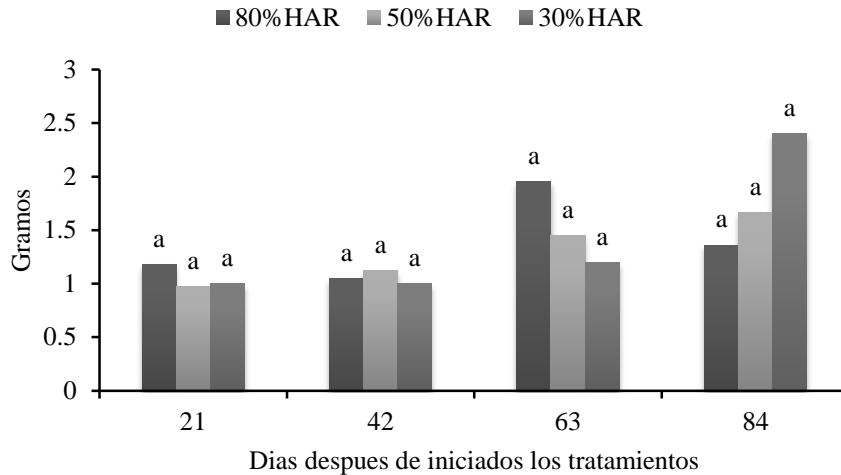
El tratamiento con 50% HAR es el que presenta el incremento de peso más constante, aunque el mayor peso obtenido lo alcanzó el tratamiento de 80% HAR con un valor de 9.91g a los 84 días de tratamiento.



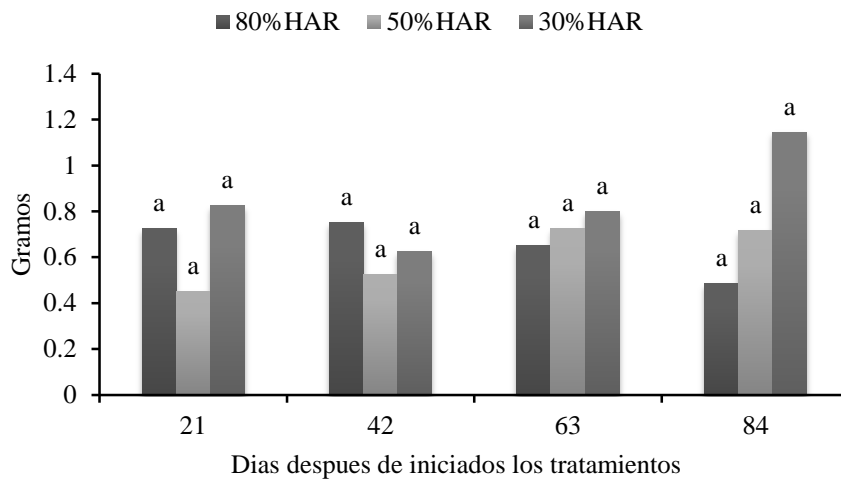
**Figura 27.** Materia seca de la raíz para la capa de sustrato perteneciente a una profundidad de 0 a 7 cm (ES. 0-7), 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

La materia seca que se obtuvo para la capa de sustrato ES. 7-14, se presenta en la Figura 28, en este caso no hubo diferencias significativas entre tratamientos en ninguno de los muestreos, pero se observó que la tendencia es al aumento de peso en el tiempo en los tres tratamientos; los aumentos de peso fueron más marcados para el tratamiento con 30% HAR seguidos del tratamiento con 50% HAR y finalmente el tratamiento con 80% tuvo poca tendencia al aumento de peso.

En la Figura 29 se presentan los pesos secos de la raíz en la última capa de sustrato (14-21cm), sin mostrar diferencias significativas; los tratamientos con 30% HAR y 50% HAR presentaron tendencia a aumentar el contenido de materia seca, mientras que el tratamiento con 80% HAR mostró pesos cada vez más bajos.



**Figura 28. Materia seca de la raíz para la capa de sustrato perteneciente a una profundidad de 7 a 14 cm (ES. 7-14), 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).**



**Figura 29. Materia seca de la raíz para la capa de sustrato perteneciente a una profundidad de 14 a 21 cm (ES. 14-21), 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual. Mismas literales son estadísticamente iguales según prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).**

El estudio del sistema radical en plantas de Jitomate en diferentes capas del sustrato permitió observar las diferencias en su desarrollo, mismas que mostraron diferencias en función de la etapa de crecimiento del cultivo y porcentaje de humedad aplicado.

En general, el tratamiento con 30% HAR presentó un incremento de peso más apreciable en las capas más profundas del contenedor, lo cual concuerda con la literatura en la cual se ha determinado que la biomasa radical puede presentar más desarrollo bajo un déficit de humedad. López *et al.* (2008) encontraron que en un cultivo con raíz dividida en Jitomate la humedad más baja en un sustrato de tezontle induce mayor crecimiento radical.

Resultados similares fueron encontrados por Córdoba *et al.* (2011), en un estudio de humedad con raíces de pino determinaron que la aplicación de 20% de humedad aprovechable en profundidades de 15cm influye en la elongación de raíces laterales aumentando 166% su número, además de incrementar las raíces finas en 80% aunque sin presentar diferencias significativas en biomasa total. Cortes *et al.* (2000) determinaron que aunque el riego restringido puede generar mayor crecimiento radical, distintas variedades de un mismo cultivo pueden tener respuestas variables en producción de raíz.

En la presente investigación en las capas intermedias y profundas del sustrato los tratamientos con 50% HAR y 80% HAR presentaron tendencia a la disminución de materia fresca y en los 14-21cm el tratamiento que presentó menor ganancia de biomasa fue el de 80% HAR. En cambio la producción de materia seca presentó aumento para los tres tratamientos excepto para el tratamiento con 80% HAR en el cual disminuyó la producción de materia seca en la capa ES 14-21cm. El tratamiento con 50% HAR presentó los datos más consistentes, es decir, en aumento o disminución constante, mientras que los otros dos tratamientos presentaron más variación de pesos en cuanto a disminución o aumento durante el experimento.

El desarrollo de las raíces puede verse influenciado negativamente ya sea por el volumen del contenedor (Saito *et al.* 2008) o por la compactación del suelo (Osuna *et al.* 2006, Hossne *et al.* 2012). En el primer caso, la cantidad de agua disponible depende del tamaño del contenedor en el que se encuentran las plantas, y en el segundo, el crecimiento radical es promovido debido a la mayor cantidad de agua disponible y en este caso las raíces pueden profundizar más.

La frecuencia de riego influye en la producción de jitomate, además, la hora de aplicación de agua es un factor de importancia en este cultivo, Ismail *et al.* (2007) estudiaron el sistema radical de un cultivo de Jitomate y determinaron que la plantas regadas con

frecuencia de 1 día produjeron más materia seca que las plantas que se regaron cada 5 días, sin embargo las raíces creciendo con una frecuencia de riego de 5 días presentaron más biomasa radical en las zonas más profundas de 50cm.

La disminución de la producción de materia fresca y seca de la raíz (80% HAR) puede deberse a la mayor cantidad de agua disponible la cual aunque no fue excesiva si altero el crecimiento de la raíz, dado que las elevadas cantidades de agua en la raíz provocan mayor producción de etileno el cual inhibe la elongación de las raíces, (Pardos, 2004), además, de la degradación de proteínas y clorofilas en la planta y muerte celular de la raíz por acidificación citológica debido a la acumulación de sustancias toxicas (De la Cruz et. al. 2012), Moreno y Fischer (2013) afirman que uno de los efectos de la elevada cantidad de agua en las raíces es una disminución de la actividad fotosintética la cual reduce la producción de azúcares necesarios para el crecimiento de la raíz.

La raíz es uno de los órganos más afectados por la mayor humedad en el sustrato, ya sea que esta se presente en forma de anegamiento o que se mantenga a un cultivo con alta humedad por mucho tiempo, en leguminosas con 42 días de anegamiento se registraron signos de descomposición y reducción de peso radical (Vignolio *et. al.* 1994), Gil *et. al.* (2007) encontraron que plantas de aguacate (*Persea americana Mill.*) regadas con altas cantidades de agua presentaron 10.6% menos peso seco en las raíces que las plantas regadas normalmente. El efecto de la elevada humedad en el suelo depende de la tolerancia de las especies y en Jitomate se presenta mayor disminución de la producción de materia seca (hasta 56.1% menos) cuando se somete a condiciones de elevada humedad (Baracaldo *et. al.* 2014) por lo cual es necesario que en un proceso de producción mantenga con un adecuado riego al cultivo.



### 6.3 Relaciones hídricas.

#### 6.3.1 Contenido total de agua por planta.

Se determinó el contenido total de agua mediante la diferencia entre materia fresca y seca de las unidades experimentales, en el Cuadro 14 se muestran los resultados, los datos se presentan en mililitros de agua contenida y el porcentaje de agua en la planta.

**Cuadro 14. Contenido de agua en las diferentes secciones de las plantas por fecha de muestreo y humedad aprovechable aplicada.**

PARTE DE LA PLANTA	HUMEDAD APROVECHABLE RESIDUAL APLICADA											
	80%	50%	30%	80%	50%	30%	80%	50%	30%	80%	50%	30%
	DIAS DESPUES DE INICIADOS LOS TRATAMIENTOS.											
	21			42			63			84		
	CONTENIDO DE AGUA EN MILILITROS											
RAIZ	92.96	77.50	70.83	75.67	81.33	76.88	73.88	79.65	79.00	66.08	75.85	82.68
TALLO	119.05	117.20	91.43	197.40	179.55	147.47	232.72	210.92	193.73	278.08	245.15	206.03
FRUTO	230.58	250.00	215.95	1057.85	989.35	890.02	2383.27	2187.52	1646.18	3405.08	2830.75	2152.15
HOJA	260.73	260.30	186.70	403.71	380.50	320.02	455.45	464.52	361.96	532.22	461.68	386.94
FLOR	2.87	2.90	2.02	1.05	1.12	0.98	0.78	1.05	0.92	0.67	0.50	0.52
PODA	2.67	5.89	5.80	15.30	11.29	5.78	14.02	14.29	17.92	15.67	13.29	13.14
TOTAL	92.96	77.50	70.83	75.67	81.33	76.88	73.88	79.65	79.00	66.08	75.85	82.68
	CONTENIDO DE AGUA EN PORCENTAJE											
RAIZ	13.11	10.86	12.37	4.32	4.95	5.33	2.34	2.69	3.44	1.54	2.09	2.91
TALLO	16.79	16.42	15.96	11.27	10.93	10.23	7.36	7.13	8.42	6.47	6.76	7.25
FRUTO	32.53	35.02	37.71	60.41	60.21	61.76	75.42	73.95	71.58	79.23	78.04	75.74
HOJA	36.78	36.47	32.60	23.06	23.16	22.21	14.41	15.70	15.74	12.38	12.73	13.62
FLOR	0.40	0.41	0.35	0.06	0.07	0.07	0.02	0.04	0.04	0.02	0.01	0.02
PODA	0.38	0.83	1.01	0.87	0.69	0.40	0.44	0.48	0.78	0.36	0.37	0.46
TOTAL	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Se puede observar que en los tratamientos con 80% HAR y 50% HAR el contenido de agua en la hoja representó el mayor porcentaje con 36.78 y 36.47% respectivamente a los 21 días, mientras que en el tratamiento con 30% HAR la mayor cantidad de agua se presentó en el fruto con un 37.31%.

En los muestreos de los días 42, 63 y 84, el contenido de agua fue mayor en el fruto en todos los tratamientos, alcanzando un valor máximo de 79.23% para el tratamiento con 80% HAR a los 84 días de experimento. En general, el fruto y la hoja fueron los órganos en los cuales se encontró el mayor porcentaje de agua, para todos los tratamientos.

El análisis del contenido de agua en la raíz indicó que en los tratamientos con 80 y 50% HAR las raíces disminuyeron el contenido de agua durante el desarrollo del experimento, más marcado en el tratamiento con 80% HAR, en contraste con el tratamiento con 30% HAR en el cual el contenido de agua total en raíz es cada vez mayor, lo cual puede deberse a que las raíces de este tratamiento fueron creciendo, en cambio en los otros dos tratamientos la raíz fue volviéndose más leñosa.

### **6.3.2 Aplicación de riegos y porcentajes de humedad en el sustrato.**

Para determinar el momento de la aplicación de riegos se fue colocando el TDR en las tres profundidades del sustrato (0-7, 7-14 y 14-21cm), después, se fueron estimando los porcentajes de humedad aprovechable residual por estrato, se calculó la cantidad de agua para volver a dejar el sustrato a capacidad de campo en cada capa y se sumó para obtener la cantidad total de riego a aplicar. Como se muestra en la Figura 9, la ecuación que relaciona la lectura del TDR con la humedad volumétrica es  $y = -0.0169x^2 + 1.915x - 5.9606$  en la cual el valor de “y” indica el valor de humedad en el sustrato y “x” indica el valor obtenido con el TDR.

Los riegos se aplicaron con la frecuencia determinada con TDR para cada tratamiento en promedio para el tratamiento con 80% HAR se aplicaban 5 riegos al día, para el tratamiento de 50% HAR necesitaba dos riegos, mientras que para el tratamiento con 30% HAR se aplicó un riego al día, en total se aplicaron 409 riegos para el tratamiento de 80% HAR, 132 riegos para el tratamiento de 50% HAR y 84 riegos para 30% HAR (Ver apéndice), en la presente investigación las cantidades de agua aplicadas por día variaron entre 862.5mL (80% HAR) y 655.5mL (30% HAR), estos valores están por debajo de lo reportado por Flores *et al.* (2007) quienes determinaron en un cultivo de Jitomate un consumo promedio de 1.3L día<sup>-1</sup> realizando el cálculo con lisímetro.

Durante el desarrollo del experimento se observaron síntomas de deficiencia hídrica, más marcados en el tratamiento con 30% HAR ya que en este caso la frecuencia de riego fue

de aproximadamente un día. En los tratamientos con 50% HAR y 80% HAR hubo pocas situaciones de estrés hídrico, las cuales se presentaban en días con poca nubosidad. En días con alta humedad atmosférica o con lluvia, las plantas que se mantuvieron con 30% HAR no presentaron síntomas de estrés hídrico, aunque llegaran a un nivel más bajo de humedad aprovechable lo cual si ocurría en días soleados (Figura 30.)



80% HAR

50% HAR

30% HAR

**Figura 30. Estrés hídrico en líneas con 30% HAR al momento de llegar a su punto más bajo de humedad.**

Las Figuras 31, 32 y 33 muestran los riegos aplicados para los tratamientos de 80, 50 y 30% HAR respectivamente, y la humedad para cada capa del sustrato analizado al momento del riego. Se observa que hubo mucha variabilidad en la humedad del sustrato por capas lo cual puede tener diferentes causas.

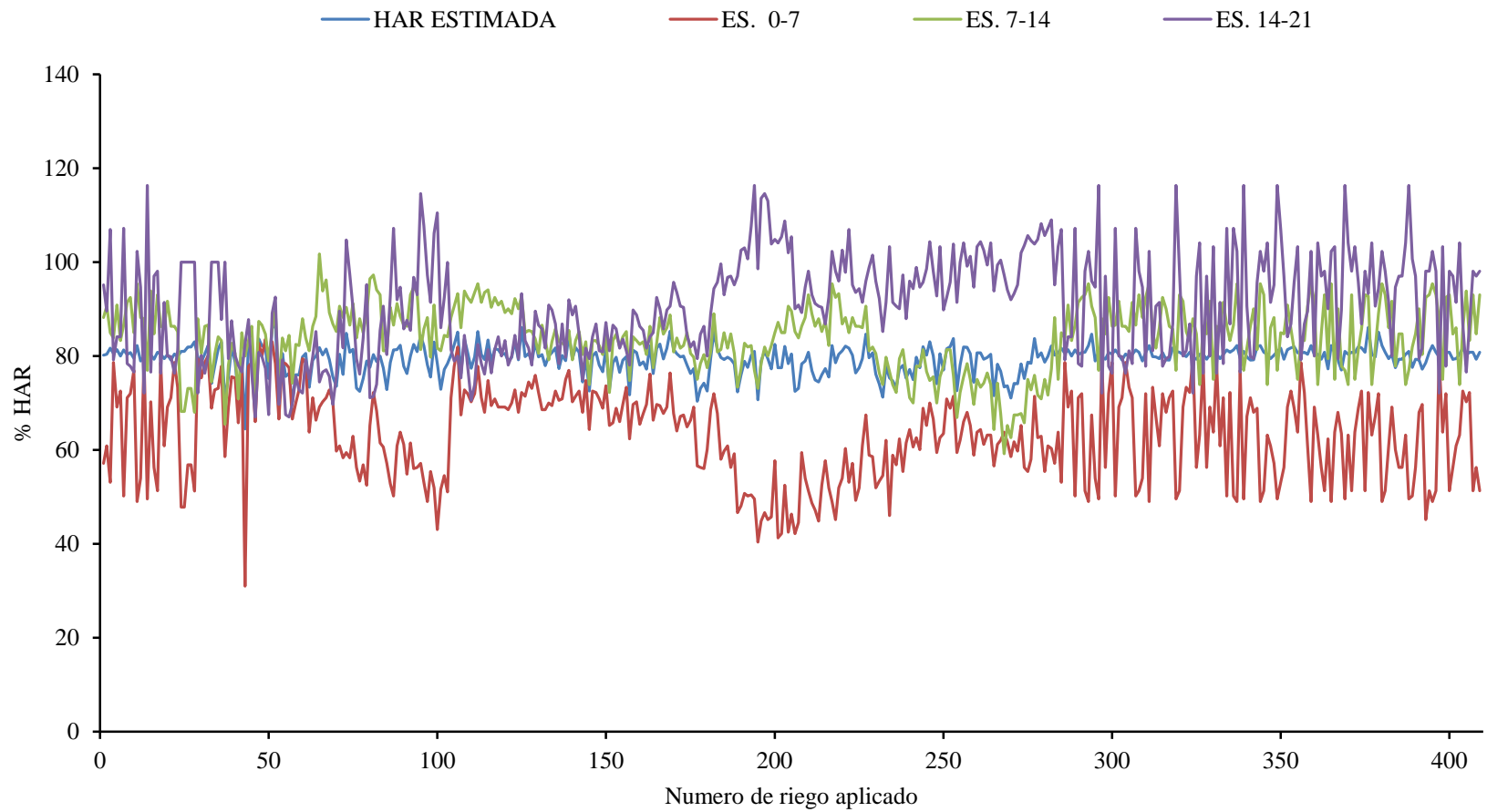
El funcionamiento del sistema de riego no consideraba fracciones menores que un minuto, por lo cual se redondearon los minutos de riego calculados por el programa en Excel<sup>®</sup> en forma fraccionaria a un valor entero, en este contexto, las máximas diferencias en las fracciones de riego fueron de 0.5 min que dan 17.25 mL, aunque en la mayoría de los casos las fracciones de minuto fueron menores, esto pudo haber representado mayor problema para el tratamiento con 80% HAR debido a que una cantidad de 17.25 mL implica un 9.82% de riego aplicado en mayor o menor cantidad, en cambio para el tratamiento con 30% HAR un tiempo de riego de 0.5 min significa solo un 2.6% de diferencia en los mililitros de agua agregados.

El propio funcionamiento del TDR fue otra de las causas de la variabilidad ya que el sensor provisto de tres varillas fue insertado en las macetas con sustrato con mayor frecuencia para el tratamiento con 80% HAR, las continuas inserciones en el mismo lugar fueron provocando que los orificios se fueran agrandando, esta holgura provoco que el TDR diera una lectura errónea la cual indicaba una humedad menor a la real.

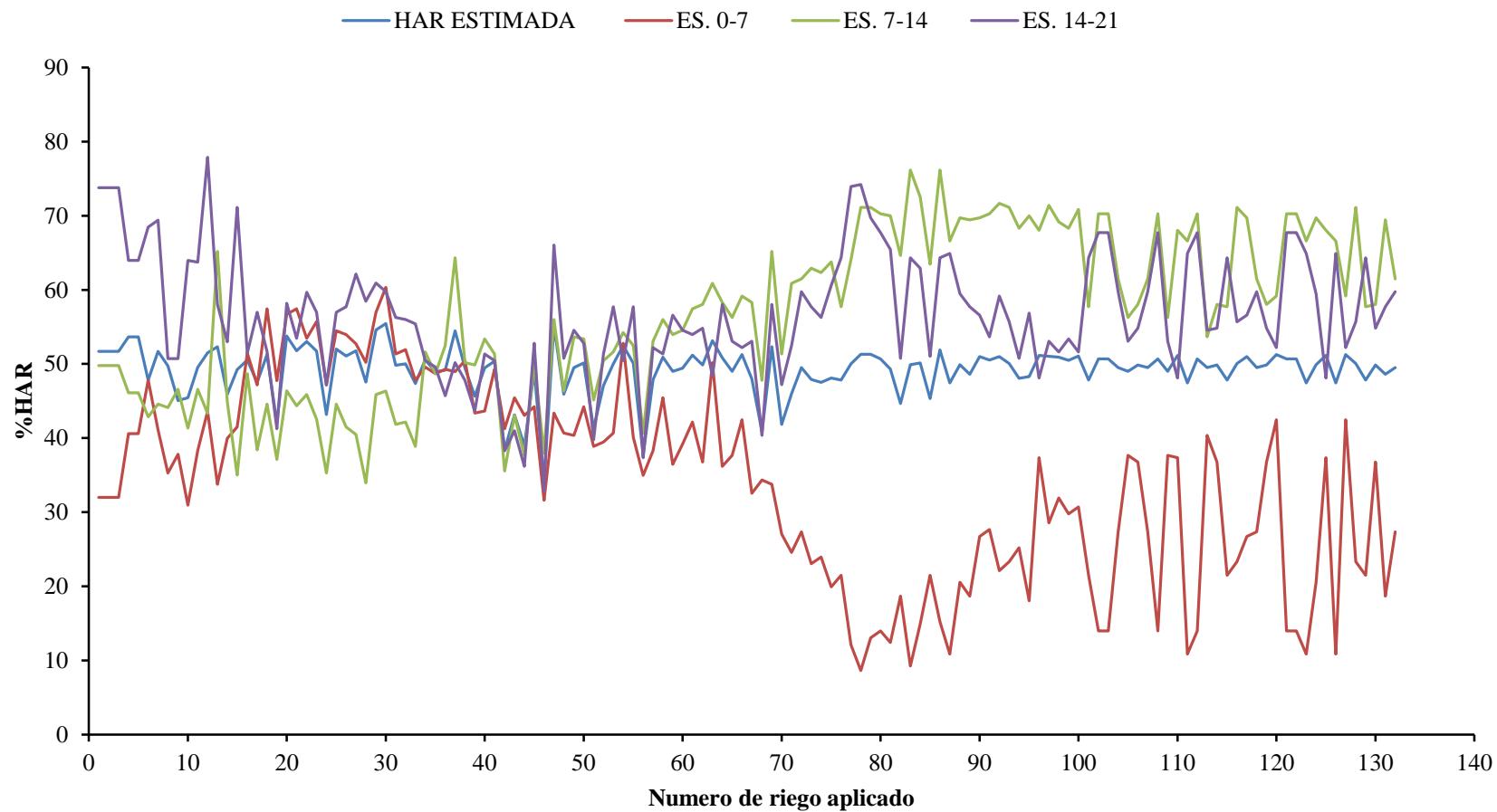
En cada muestreo fueron cambiando las macetas en las cuales se hicieron las detecciones de humedad, con esta acción se corregía momentáneamente el problema de la holgura en los sitios de lectura, sin embargo al paso del tiempo este problema volvía a ocurrir dando lugar a un aumento de humedad del sustrato y un cálculo diferente de humedad por capas en el sustrato.

Otra de las causas de la variación de la humedad fue la siguiente; en todos los tratamientos se detectaba un bajo contenido de humedad en las primeras horas del día, pero en ocasiones, al momento de regar se observaron algunos lugares drenando agua, es decir, a esa hora el sustrato contenía humedad que no fue detectada con el TDR, lo cual pudo deberse a que la evapotranspiración en ese momento se daba en bajas tasas, otro de los factores que pudo influir fue que la lenta evaporación permitía que el agua se mantuviera en las partes bajas del sustrato.

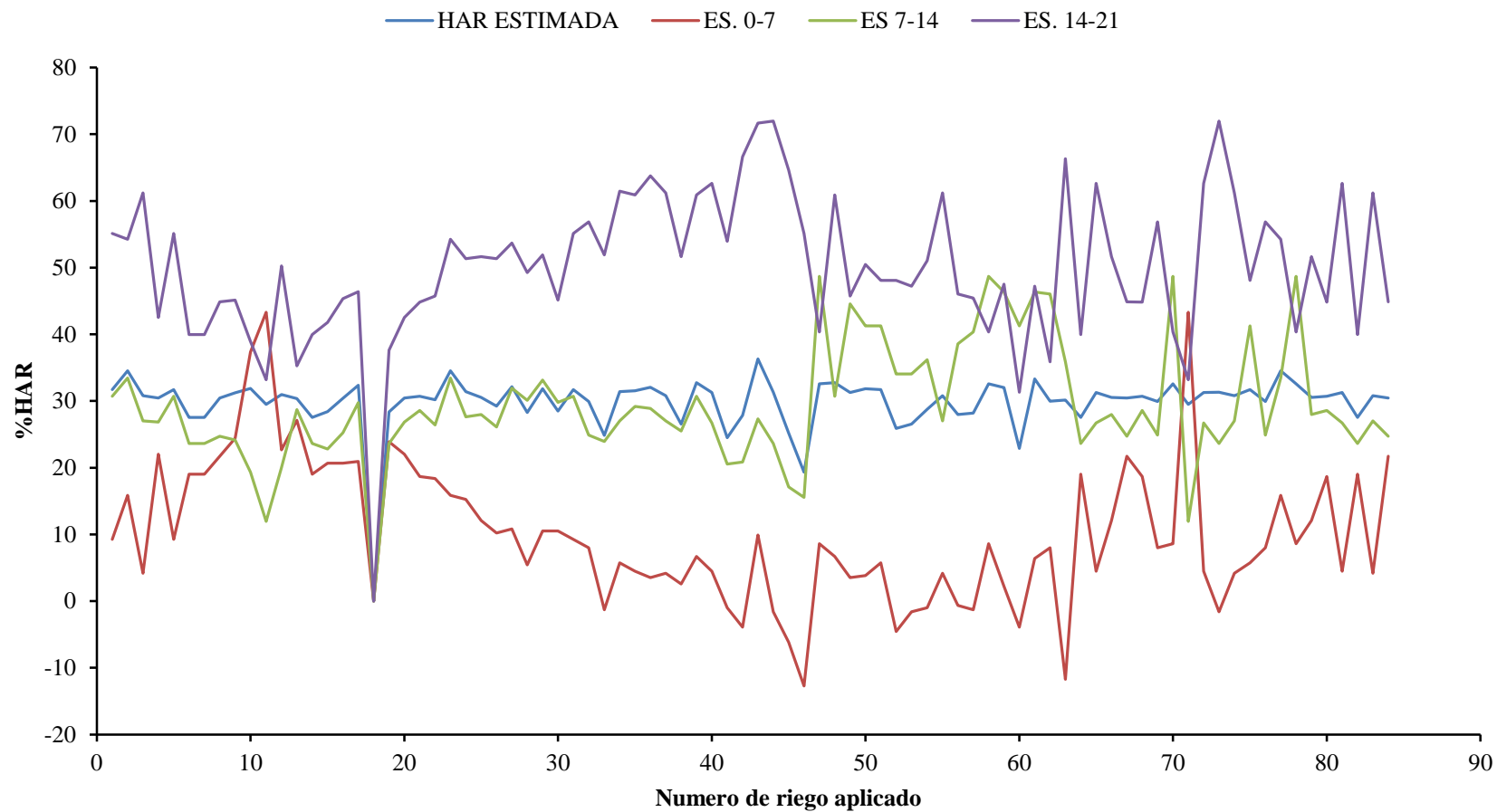
Los inconvenientes detectados con el uso del TDR se fueron corrigiendo con lo cual se pudo mantener el nivel de humedad del sustrato en valores cercanos a los establecidos dado que es un dispositivo que presenta buenos registros de humedad en comparación con otros dispositivos similares (Fernández *et al.* 2004).



**Figura 31. Humedad en capas para 80% HAR, HAR ESTIMADA= Valor cercano o igual a 80% HAR al momento del riego. ES 0-7= Humedad Aprovechable Residual de 0 a 7 cm, ES 7-14= Humedad Aprovechable Residual de 7 a 14cm, ES14-21= Humedad Aprovechable Residual de 14 a 21cm.**



**Figura 32. Humedad en capas para 50%HAR, HAR ESTIMADA= Valor cercano o igual a 50%HAR al momento del riego. ES 0-7= Humedad Aprovechable Residual de 0 a 7 cm, ES 7-14= Humedad Aprovechable Residual de 7 a 14cm, ES14-21= Humedad Aprovechable Residual de 14 a 21cm.**

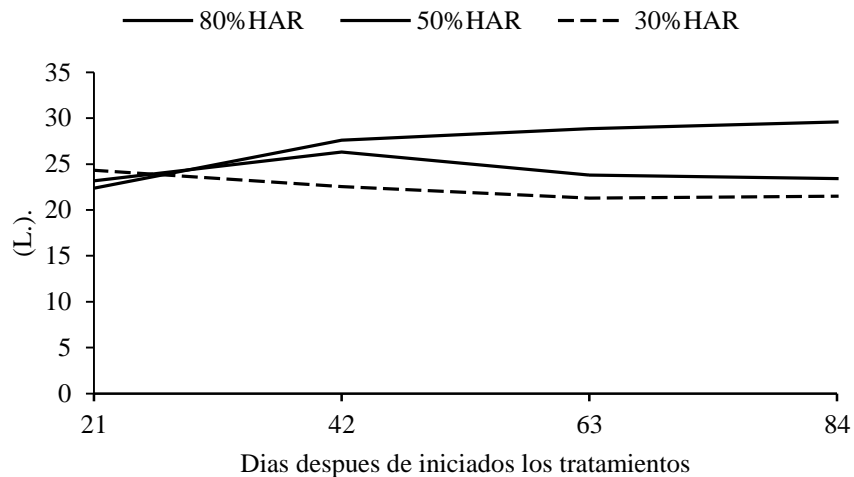


**Figura 33. Humedad en capas para 30%HAR, HAR ESTIMADA= Valor cercano o igual a 30%HAR al momento del riego. ES 0-7= Humedad Aprovechable Residual de 0 a 7 cm, ES 7-14= Humedad Aprovechable Residual de 7 a 14cm, ES14-21= Humedad Aprovechable Residual de 14 a 21cm.**

### 6.3.3 Requerimientos de agua.

Para cada tratamiento se determinó la cantidad de agua aplicada. En la Figura 34 se muestran las cantidades de agua aplicadas para cada tratamiento entre cada muestreo y en la Figura 35 la cantidad de agua aplicada acumulada hasta la finalización del experimento.

La cantidad de agua aplicada se obtuvo al multiplicar los minutos de riego aplicados por el valor del caudal calculado del gotero de  $34.5\text{ mL min}^{-1}$ . Las cantidades de agua totales aplicadas por tratamiento se determinaron sumando el agua aplicada entre un muestreo y otro y agregando a este resultado el valor del agua aplicada desde el trasplante hasta el inicio de tratamientos ya que en este periodo también hubo producción de materia vegetal, el agua aplicada en tal periodo fue la misma para los tres tratamientos y su valor es de 245 minutos de riego u 8.45L.



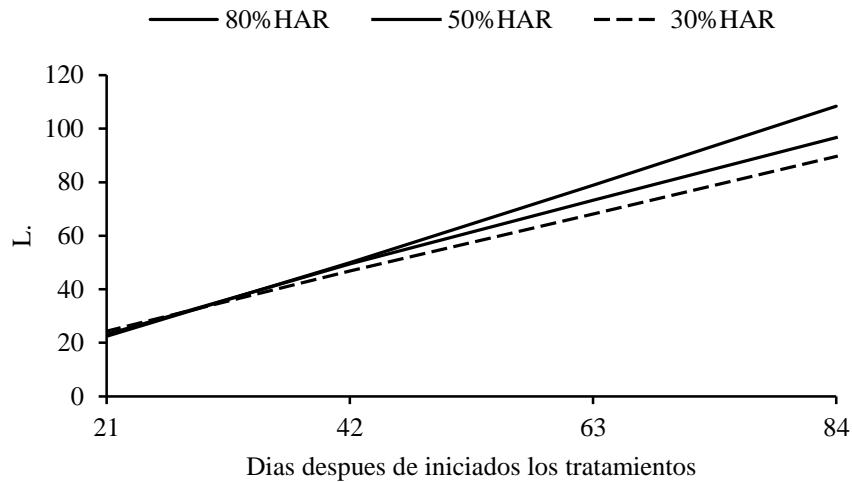
**Figura 34. Agua aplicada (Litros) por tratamiento entre muestreos. 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual.**

Como se puede observar, de los 21 a los 42 días, hubo un incremento más marcado en las necesidades de agua en los tratamientos con 80 y 50% HAR esta característica puede deberse a que antes de iniciar los tratamientos las plantas se mantuvieron con poca agua disponible a fin de no saturar las macetas las cuales no tenían orificios de drenaje con lo cual hubo un desarrollo limitado de las mismas, al momento de aplicar más agua se presentó más desarrollo vegetativo para estos tratamientos, en cambio, el tratamiento con 30% HAR continuó teniendo poca agua disponible.



A partir del día 42 de tratamientos, se presentó disminución de requerimientos de agua también en el tratamiento con 50% HAR, en este caso es posible que la disminución en las necesidades de agua se deba a la poda de hojas maduras y al llenado de fruto.

Por otra parte, se analizaron los requerimientos incrementales de agua para cada tratamiento. La figura 35 muestra cómo se fue incrementando el agua aplicada por tratamiento, el agua total aplicada se determinó para una planta y su valor total es el registrado en el día 84 de experimento.



**Figura 35. Agua aplicada acumulada (Litros) por tratamiento. 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual.**

Los requerimientos de agua al final del experimento fueron: para el tratamiento con 30% HAR se necesitaron 89.66 litros por planta; el tratamiento con 50% HAR requirió 96.73 litros por planta, el cual es 7.88% más alto; finalmente, el tratamiento con 80% HAR necesito de 108.46 litros por planta, 20.96% mayor que las necesidades del tratamiento con 30% HAR.

### 6.3.4 Eficiencia en el uso del agua.

Se determinó la eficiencia en el uso del agua del cultivo tomando en cuenta la producción de biomasa fresca total por tratamiento y la producción de fruto comercial. Para los cálculos se consideró el agua total aplicada por tratamiento contabilizada a partir del trasplante, en este caso todo el cultivo se mantuvo con la misma aplicación de agua desde el trasplante hasta el inicio de tratamientos, acumulándose 8.45L; se estuvo aplicando poca cantidad de agua con la finalidad de no saturar el sustrato el cual no tenía orificios de drenaje.

El agua evapotranspirada en este caso se consideró como la cantidad de agua aplicada por tratamiento ya que se trabajó en un sistema sin drenaje en las macetas en el cual las únicas entradas de agua se deben al riego. Para el cálculo de la eficiencia en el uso del agua se usó la siguiente fórmula  $EUA_b = \text{Biomasa total producida (g.)} / \text{Agua evapotranspirada (L.)}$ , en este caso se utilizó el término  $EUA_b$  para la biomasa total y  $EUA_f$  para la producción de fruto comercial.

En el Cuadro 15 se muestran la biomasa total producida por tratamiento y la cantidad de agua evapotranspirada. Como se observa, la producción de biomasa estuvo en función de la cantidad de agua aplicada, la biomasa corresponde a la materia fresca total producida incluyendo podas de brotes axilares, hojas maduras y corte de frutos maduros.

**Cuadro 15. Biomasa total por tratamiento y cantidad de agua evapotranspirada (Et).**

<b>Tratamiento</b>	<b>Et. (L)</b>	<b>Biomasa (kg)</b>
80% HAR	108.46	4.697
50% HAR	96.73	4.041
30% HAR	89.66	3.174

**80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual.**

En el Cuadro 16 se muestra la producción de fruto cosechado en estado de madurez comercial, en total se realizaron 4 cosechas, el análisis estadístico mostró que no hubo diferencias significativas para el peso total de frutos ni para número de frutos producido.

**Cuadro 16. Prueba de medias para producción de fruto comercial y numero de frutos.**

Tratamiento	Peso kg.	Frutos
80% HAR	1.51a*	16a
50% HAR	1.74a	21a
30% HAR	1.24a	18a
DMS	0.68	5.86
CV	21	14.67

\* Valores con la misma literal son estadísticamente iguales, Prueba de Tukey con  $\alpha=0.05$ , DMS= Diferencia Mínima Significativa, CV= Coeficiente de variación. 80% HAR=80% de Humedad Aprovechable Residual, 50% HAR=50% de Humedad Aprovechable Residual, 30% HAR= 30% de Humedad Aprovechable Residual.

Como se puede observar en el caso de la producción de fruto el tratamiento con 50% HAR produjo la mayor cantidad de fruto mientras que el tratamiento con 30% HAR tuvo la menor producción de fruto, sin embargo el peso promedio de los frutos es 94.37, 82.85 y 68.88 gramos para los tratamientos 80, 50 y 30% HAR respectivamente, es decir, el tamaño del fruto maduro estuvo en función de la humedad aprovechable del sustrato.

La eficiencia en el uso del agua se presenta en el Cuadro 17, como se observa en este caso a mayor porcentaje de humedad aprovechable en el sustrato se incrementa la  $EUA_b$ , mientras que para el caso de la producción de fruto el tratamiento con 50% HAR presento la mayor  $EUA_f$  lo cual es de mayor importancia dado que el fruto es la parte de la planta que se aprovecha y de mayor interés agronómico.

**Cuadro 17. Eficiencia en el uso del agua (Kg de materia por  $m^3$  de agua agregada) para la biomasa total y producción de fruto por tratamiento.**

% HAR	$EUA_b$	$EUA_f$
80	43.30	13.92
50	41.78	17.99
30	35.40	13.83

En cuanto a la producción de biomasa total Valenzuela *et al.* (2009) determinaron en un cultivo de maíz una EUA de  $44.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  mientras que en un cultivo de soya la EUA fue de  $18.6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ , en este caso la diferencia se debe a las características del desarrollo propias de cada cultivo; los cultivos se establecieron sin deficiencias de agua.

La determinación de la eficiencia en el uso del agua varía según las condiciones de manejo del cultivo; Ojodeagua *et al.* (2008), determinaron que la eficiencia en el uso de agua fue mayor en un cultivo de Jitomate que se mantuvo cultivado en suelo natural con 43 kg de fruto producido por m<sup>3</sup> de agua, en cambio, cuando el cultivo se mantuvo creciendo en un sustrato de Tezontle se generaron eficiencias de 27-29k gm<sup>-3</sup>. Macías (2009), para Jitomate obtuvo una eficiencia en el uso del agua de 12.62, 11.26 y 12.3 kg m<sup>-3</sup> cuando aplicó 1, 1.25 y 0.75 del valor de la evapotranspiración en invernadero, en este caso la adición de una mayor cantidad de agua incluso disminuyo, la eficiencia para producir fruto.

La aplicación de una cantidad limitada de riego puede producir problemas de pudrición apical (Blossom end root). Matos *et al.* (2011) determinaron que en un cultivo de jitomate las plantas que se mantuvieron con una mayor frecuencia de riego produjeron más fruto que aquellas que se mantuvieron con un riego al día, además, las plantas con más riego presentaron menor pudrición apical.

La producción de un cultivo en condiciones protegidas de invernadero no requiere de mucha adición de agua de riego ya que la evapotranspiración es menor que en un cultivo a cielo abierto (Mpusia, 2006). León *et al.* (2005) determinaron que el cultivo de Jitomate en invernadero puede requerir hasta 20% menos adición de agua, la aplicación de mayores cantidades de agua que las que requiere un cultivo en invernadero pueden producir plantas de mayor tamaño. Macías *et al.* (2010) determinaron que para el caso del cultivo de Jitomate incluso el rendimiento no se incrementa.

En la presente investigación las plantas mantenidas con 50%HAR presentaron más eficiencia en el uso del agua para producir fruto comercial, además, los resultados de análisis de biomasa fueron más consistentes por lo que se puede inferir que es un tratamiento adecuado, sin embargo los resultados pueden deberse a que este tratamiento se encontró en medio de los de 30 y 80%HAR respectivamente en ambas líneas, con lo que se amortiguaron los efectos de la evapotranspiración debido al efecto orilla con el cual se reduce el crecimiento de las plantas debido a la mayor cantidad de viento y radiación.

## 7 CONCLUSIONES

El sistema radical fue afectado por los porcentajes de humedad aprovechable residual, en el tratamiento con 30% HAR se registró más desarrollo radical en las capas inferiores del sustrato (14-21cm).

Los porcentajes de humedad aprovechable afectan también la producción de biomasa en el tallo, fruto hoja, flor y podas en plantas de Jitomate, en general, con niveles de humedad más altos se genera mayor producción de material vegetal aéreo, en la mayoría de los casos se incrementa la producción de materia fresca salvo en el caso de la producción de flor la cual fue disminuyendo su biomasa con el paso del tiempo debido a la producción de fruto.

Las necesidades de agua en el cultivo de Jitomate estuvieron influenciadas por la humedad del sustrato, cuando se mantuvo el cultivo con niveles de humedad aprovechable residual altos (80%) hubo más requerimientos de agua, contrario al bajo requerimiento hídrico con valores bajos de humedad aprovechable residual (30%) debido al cierre estomático en las hojas.

La eficiencia en el uso del agua para la producción de material como hojas y tallo se incrementa con mayor humedad en el sustrato, sin embargo en este caso, las plantas mantenidas con 50% HAR presentaron más eficiencia en el uso de agua para la producción de fruto comercial.

El TDR es un instrumento que permite determinar el momento de riego en un cultivo debido a rapidez de sus lecturas y practicidad de manejo, los valores de humedad determinados dependen de la calibración del equipo, con el modelo utilizado la determinación de la humedad del sustrato presentó variaciones debido a la repetida toma de datos en una misma maceta.

Los niveles de humedad del sustrato de tezontle empelado, pudieron ser determinados con suficiente aproximación con el sensor TDR por lo que se pudo dar el seguimiento adecuado a los tratamientos de humedad aprovechable residual (HAR) evaluados. Asimismo, con el empleo de este sensor fue posible definir el momento de riego para los diferentes tratamientos, por lo que se puede concluir que el sensor TDR es apropiado para las condiciones evaluadas: riego por goteo en sustrato de tezontle.

## 8 LITERATURA CITADA.

- Acevedo**, H., E. 1979. Interacciones agua-suelo-raíz en el proceso de absorción de agua por las plantas. *Biol. Tec.* 44:17-25.
- Alarcón**, V., A. L. 2000. Tecnología para cultivos de alto rendimiento. Universidad politécnica de Cartagena. España. 414p.
- Arévalo**, H., J. J.; Vélez, J., E. y Camacho, T., J. H. 2013. Uso eficiente del agua para el cultivo de rosa cv. Freedom bajo invernadero. *Revista Brasileira de Engenharia agrícola e ambiental* 17(8): 811-817.
- Baixauli**, S., C. y Aguilar, O., J. M. 2002. Cultivos sin suelo de hortalizas, aspectos prácticos y experiencias. Generalitat Valenciana. Valencia España. 110p.
- Baracaldo**, A., Carvajal, R., Romero., A., P., Prieto, A., M., García., F., J., Fischer., G. y Miranda., D. 2014. El anegamiento afecta el crecimiento y producción de biomasa en tomate chonto (*Solanum Lycopersicum* L.), cultivado bajo sombrio. *Revista colombiana de ciencias hortícolas* 8: 92-102.
- Bautista**, M., N.; Chavarin, P., C. y Valenzuela, E., F. 2010. Jitomate, tecnología para su producción en invernadero. Colegio de Postgraduados. 2ª Ed. Montecillo, Texcoco, Estado de México No, México. 213p.
- Besoain**, E. 1985. Mineralogía de arcillas de suelos. Instituto interamericano de cooperación para la agricultura (Ed.). San Jose, Costa Rica. 1216p
- Bravo**, E., M.; Serrato, B, B.; Fregoso, T., L. y Medina, O., L. 2009. Evaluación empírica de la reflectometría de dominio temporal para estimar la humedad en dos suelos de origen volcánico. *Terra Latinoamericana.* 27: 171-176.
- Burés**, S. 1997. Sustratos. Ediciones Agrotécnicas, S. L. Madrid. España. 342p.
- Cadahia**, L., C. 2005. Fertirrigación: Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales. Ediciones Mundi-Prensa. 3ª Ed. España. 681p.
- Casanova**, O., E. F. 2005. Introducción a la ciencia del suelo. Consejo de desarrollo científico y humanístico, Universidad central de Venezuela. 2ª ed. Venezuela. 454p.
- Casas**, F., R. 2012. El suelo de cultivo y las condiciones climáticas. Ediciones Paraninfo S. A. España. 235p.

- Casierra, P., F.;** Constanza, C., M. y Cárdenas, H., J. F. 2007. Análisis del crecimiento en frutos de tomate (*Lycoersicum esculentum* Mill.) cultivados bajo invernadero. *Agronomía colombiana* 25(2): 299-305
- Castro, P., M.** 2008. Desarrollo de un sistema de riego automatizado en tiempo real con base en balance hídrico climático, medición de humedad del suelo y lisímetro. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados, Montecillo México. 327p.
- Çengel, Y., A.** 2007. Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico. Traducción al español de Pérez, C., J. H y Enríquez, B., J. McGraw-Hill. México. 903p.
- Çengel, Y., A. y Boles, M., A.** 2003. Termodinámica. Traducción al español de Campos, O., V y Colli, S., Ma. T. McGraw-Hill Interamericana. México. 829p.
- Comisión Nacional de Agua (CONAGUA).** 2013. Sistema nacional de información sobre cantidad, calidad, usos y conservación del agua. In: <http://201.116.60.25/sina/Default5.aspx?tab=74> (Revisado el 30 de Diciembre de 2014).
- Comisión Nacional de Agua (CONAGUA).** 2014. Atlas del agua en México 2014. México. 142p.
- Córdoba, R., D.;** Vargas, H., J.J.; López, U., J. y Muñoz, O., A. 2011. Crecimiento de la raíz en plantas jóvenes de *Pinus pinceana* Gordon en respuesta a la humedad del suelo. *Agrociencia* 45: 493-506.
- Cortez, S.;** Camacho, S., A.; Martínez, G.; Kuruvadi, S. y Mendoza, M. 2000. Sistema radical en genotipos de papa bajo condiciones de invernadero. *Agronomía Mesoamericana* 11(1):139-143.
- Chamú, B., J. A.** 2010. Respuesta del pimiento morrón al secado parcial de la raíz y sustratos en hidropónia e invernadero. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 186p.
- De la cruz, J., J. Moreno, L., P. y Magnitskiy S.** 2012. Respuestas de las plantas al estrés por inundación. Una revisión. *Rev. Col. de ciencias hortícolas* 6: 96-109.
- Dela Cruz, L., E.;** Estrada, B., M.; Robledo, T., B.; Osorio, O., R.; Márquez, H., C. y Sánchez, H., R. 2009. Producción de tomate en invernadero con composta y vermicomposta como sustrato. *Universidad y ciencia, trópico húmedo.* 25 (1): 59-67.
- Delta-T, Devices.** 2007. User manual for the WET sensor type wet 2 Versión 1.4, The Netherlands. 42p.

- Enrique, B., H.;** Alvarez, H., J. G. y Daniel, R., J. 2008. Efecto del déficit de agua en el trasplante de plántulas de tomate (*Solanum Lycopersicum L.*). *Agronomía Colombiana* 26 (2):246-255.
- Esmeral, V., Y. R. y González, M., C. A.** 2011. Análisis de la evapotranspiración real en cultivo de rosa. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 94p.
- FAO,** 2006. Evapotranspiración del cultivo. Estudio FAO riego y drenaje, Manual 56. Roma. 323p.
- FAO.** 2002. El cultivo protegido en clima mediterráneo. Estudio FAO producción y protección vegetal. Manual 90. Food and Agriculture. Roma. 344p.
- Félix, V., H.** 2011. Regulación de la hidratación y la turgencia foliares por mecanismos evitadores del estrés y resistencia al déficit hídrico en Vid, modelo vs experimentos. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. 220p.
- Fernández, M., D.;** Bonachela, S.; Contreras, A. y González, A., M. 2004. Evaluación de un equipo de medida continua de humedad basado en la reflectometría en el dominio de frecuencias en un suelo enarenado. In. XXII Congreso nacional de riegos, La Rioja. Estación experimental de Cajamar. España. 11p.
- Fernández, R., D. S.;** Martínez, M., M. R.; Tavarez, E., C. A.; Castillo, V., R. y Salas, M., R. 2011. Estimación de las demandas de consumo de agua. Colegio de Postgraduados. Montecillo. México. 33p.
- Flores, J.;** Ojeda-Bustamante W., López I., Rojano A., Salazar I. 2007. Requerimientos de riego para tomate en invernadero. *Terra Latinoamericana* 25 (2):127-134.
- Flores, S., I. D.** 2012. Valoración agronómica y de calidad de fruto en poblaciones nativas de jitomate mexicano. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo México. 105p.
- Gallegos, C., D.** 2012. Efecto del potencial osmótico de la solución nutritiva en la producción de Licopeno en Tomate (*Solanum Lycopersicum L.*). Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 66p.
- García, M., D.;** Petzall, K., C. y Castrillo, M. 2004. Respuesta al déficit hídrico en las variedades de tomate rio grande y pera quibor. *Agron. Trop.* 54(4): 411-431.



- Garza, A., M.; Molina, V., M.** 2008. Manual para la producción de tomate en invernadero en suelo en el estado de Nuevo León. SAGARPA. Gobierno de Nuevo León. México. 183p.
- Gil, P., Schaffer, B., Gutiérrez, S., M. y Li, C.** 2007. Efecto del anegamiento en el estatus hídrico e intercambio gaseoso y biomasa del palto (*Persea americana* Mill). VI congreso mundial del Aguacate. Viña del Mar. Chile.
- Gómez, M., E.** 2012. Producción de Jitomate (*Solanum Lycopersicum* L.) bajo condiciones protegidas e hidropónia en Tabasco. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados Montecillo México. 124p.
- González, M., A., y Hernandez, L., B. A.** 2000. Estimación de las necesidades hídricas del tomate. Terra Latinoamericana 1(1): 45-50.
- González, M., G.; Moreno, G.; Giardina, E., B. y Di Miro, M.** 2006. Exceso del agua en el suelo: Efecto sobre la calidad del fruto del duraznero *Prunus persica* (L.) Batsh. Ciencia del suelo (Argentina) 24:1-5.
- Hernandez, S., Q.; Del Castillo, S., F.; Peña, L., A. y Montalvo, H., D.** 2005. Sustratos y frecuencias de riego para la producción de Jitomate en hileras a diferente altura. Terra Latinoamericana 23(3):341-349.
- Hossne, G., A. J.; Méndez, N., J. R.; Trujillo, G., Ma. E. del V. y Parra, D., F. J.** 2012. Interacción de la frecuencia de riego, relación de solidez y tensión cortante en la profundidad de enraizamiento de soya (*Glycine max* (L) Merrill). Revista científica UDO agrícola 12(1):97-105.
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Solanum\\_lycopersicum](http://es.wikipedia.org/wiki/Solanum_lycopersicum), Revisado el 14 de Enero de 2015.
- IGME.** 2004. Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería. Instituto geológico y minero de España. Madrid, España. 360p.
- Inzunza, I., M. A.; Catalán, V., E. A.; Villa, C., Ma. M. y Delgado, R., G.** 2012. Calibración de TDR para estimar el contenido de humedad volumétrica del suelo. Relación agua-suelo-planta-agrofaz 12(3):59-65.
- Ismail, S., M.; Ozawa, K. y Khondaker, N., A.** 2007. Effect of irrigation frequency and timing on Tomato yield, soil water dynamics and water use efficiency under drip irrigation. pp. 69-84. In: Eleventh international water technology conference. Sharm El-Sheikh, Egypt.

- Jaramillo**, N, J.; Rodriguez, V., P.; Guzmán, A., M. y Zapata, M., A. 2006. El cultivo del Jitomate bajo invernadero (*Lycopersicum esculentum* Mill.). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Colombia. 48p.
- Juárez**, H., Ma. De J.; Baca, C., G. A.; Aceves, N., L. A.; Sánchez, G., P.; Tirado, T., J. L.; Sahagún, C., J. y Colinas, de L., Ma. T. 2006. Propuesta para la formulación de soluciones nutritivas en estudios de nutrición vegetal. *Interciencia* 31(4):246-253.
- Khan**, P., L.; Gil, J., A. y Acosta R. 1998. Diseño y funcionamiento de un lisímetro hidráulico para la medición de la evapotranspiración potencial. *Bioagro* 10(1): 11-17.
- Lara**, H., A. 1999. Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidropónia. *Terra* 17 (3): 221-229.
- Leiton**, S., J. S. 1985. Riego y drenaje. Editorial universidad estatal a distancia. 1ª ed. San Jose. Costa Rica. 180p.
- León**, M.; Cun, R.; Chaterlan, y Rodriguez, R. 2005. Uso eficiente del agua en el cultivo del tomate protegido. Resultados obtenidos en Cuba. *Ciencias Técnicas Agropecuarias* 14(3):9-13.
- López**, O., A.; Trejo, L., C.; Peña, V., C. B.; Ramírez, A., C.; Tijerina, Ch., L. y Carrillo, S., J. A. 2008. Secado parcial de la raíz de jitomate: Efectos en la fisiología de la planta y calidad de fruto. *Agricultura Técnica en México* 34 (3): 297-302.
- López**, S., J. A.; Castro, N., S. y Huerta A. J. 2001. Influencia del estrés hídrico sobre el contenido de ceras epicuticulares en etapas fenológicas de sorgo. *Revista fitotecnia mexicana* 24 (1): 57-62.
- Luna**, F., W.; Estrada, M., H.; Jiménez, O., J. J. M. y Pinzón, L., L. L. 2012. Efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento y eficiencia del uso del agua en plántulas de tres especies arbóreas caducifolias. *Terra Latinoamericana* 30 (4): 343-353.
- Macías**, D., R.; Grijalva, C., R. L. y Robles, C., F. 2010. Efecto de tres volúmenes de agua en la productividad y calidad del tomate bola (*Lycopersicon esculentum* Mill.) bajo condiciones de invernadero. *Biotecnia* 21(2):11-19.
- Macías**, H., R. 2009. Estimación de la evapotranspiración de cultivo y requerimientos hídricos del tomate (*Solanum Lycopersicum* Mill. cv. El Cid) en invernadero. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional. Michoacán México. 78p.

- Martínez, C., A.** y Moreno, U. 1992. Expresiones fisiológicas de resistencia a la sequía en dos variedades de papa sometidas a estrés hídrico en condiciones de campo. *Revista Brasileña de Fisiología Vegetal* 4(1): 33-38.
- Martínez, F., J.;** Sánchez, P., J. M. y Cammeraat L.H. 1994. La medida de la humedad del suelo mediante el método TDR (Time Domain Reflectometry): Estado del arte y ejemplos de aplicación. Pp. 17-27. In. I. Morell (ed.). *Investigación en zona no saturada*. Universidad de Murcia. España.
- Matos, P., R. C. de.;** Furlani, P., R. Vasconcelos, R., F.; Bodine, D.; Sakai, E.; Luiz, L., A. y Torre, N., A. 2011. Irrigation frequency and substrate volumen effects in the growth and yield of tomato plants under greenhouse conditions. *Sci. Agric. (Piracicaba Braz.)* 68(4):400-405.
- May, L., C.;** Pérez, G., A.; Ruiz, S., E.; Ic, C., A. E. y García, R., A. 2011. Efecto de niveles de humedad en el crecimiento y potencial hídrico de *Capsicum chinese* Jacq. y su relación con el desarrollo de *Bermisia tabaco* Genn. *Tropical and subtropical agroecosystems* 14: 1039:1045.
- Menziani, M.;** Rivasi, M., R.; Pugnaghi, S.; Santangelo, R. y Vincenzi, S. 1996. Soil volumetric water content measurements using TDR technique. *Annali di geofisica* 39: 91-96.
- Moreno, A., C.** y Fischer G. 2013. Efectos del anegamiento en frutales. Una revisión. *Temas agrarios* 19: 106-123.
- Moret, D.;** Arrue, J., L.; López, M., V.; Gracia, R.; Álvaro-Fuentes, J. y Salvador M. J. 2007. Determinación del perfil de humedad del suelo utilizando una sola sonda TDR: El método del nomograma. *Estudios de la zona no saturada del suelo* 3: 127-131.
- Moret, F., D.** y Lera, F. 2009. Nuevo análisis de la onda en microsondas TDR para la medida de la humedad del suelo. *Estudios en la zona no saturada del suelo* 9: 1-8.
- Mpusia, P. T. O.** 2006. Comparison of water consumption between greenhouse and outdoor cultivation. Master of science thesis. International institute for geo-information science and earth observation. Enshhede. The Netherlands. 86p.
- Núñez, S., J.** 2000. Fundamentos de edafología. Universidad Estatal a distancia (Ed). 2ª ed. Costa Rica. 188p.
- Nuño, M., R.** 2007. Manual de producción de tomate rojo bajo condiciones de invernadero para el valle de Mexicali, Baja California. Gobierno de Baja California. México. 34p.

- Ojodeagua, A., J. L.; Castellanos, R., J. Z.; Muñoz, R., J. J.; Alcantar, G., G.; Tijerina, Ch., L.;** Vargas, T., L. y Enriquez, R., S. 2008. Eficiencia del suelo y tezontle en Sistema de producción de tomate en invernadero. *Revista Fitotecnia Mexicana* 31(4):367-374.
- Osuna, C., E. S.; Figueroa, S., B.; Oleschko, K.; Flores, D., M. de L.; Martínez, M., M. R y** González, C., F. V. 2006. Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical de maíz con dos sistemas de labranza. *Agrociencia* 40:27-38.
- Pardos, J., A.** 2004. Respuestas de las plantas al anegamiento del suelo. *Invest. Agrar: Sist recur. for.* 101-107.
- Pérez, A., G. A.; Alia, T., I.; Sainz, A., M. de J.; Villegas, T., O. G.; Andrade, R., M.; López, M., V.; Moreno, L., S. y Bonilla, F., N.** 2011. Desarrollo de begonia *semperflorens-cultorum* "Olympia" en contenedor con diferentes intervalos de riego. *Ciencias Agrícolas informa* 20(1): 35-43.
- Pérez, G., M. y Castro, B., R.** 2012. El chile manzano. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 128p.
- Porta, C., J.; López-Acevedo, R., M. y Poch, C., R.** 2008. Introducción a la edafología: uso y protección del suelo. Ediciones Mundi-prensa. Madrid. 451p.
- Premuzic, Z.; Bargiela, M.; García, A.; Rendina A. e Iorio, A.** 1998. Calcium, iron, potassium, phosphorus and vitamin C content of organic and hydroponic tomatoes. *Hort. Sci.* 33(2):255-257.
- Ramírez, M., M.; Trejo-Téllez, L. I.; Gómez, M., F. C. y Sánchez, G., P.** 2010. La relación  $K^+/Ca^{2+}$  de la solución nutritiva afecta el crecimiento y calidad poscosecha del Tulipan. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33(2):149-156.
- Raviv, M. y Lieth, H.** 2008. *Soilless culture: theory and practice*. 1ª ed. Elsevier. Oxford. UK. 617p.
- Raymond, A., S. y Jerry, S., F.** 2001. *Física*. Pearson educación. 5ª ed. México. 936p.
- Rázuri, L.; Romero, D., G.; Romero, C., E. R.; Hernandez, J., D. y Rosales, J., G.** 2008. Efecto del riego deficitario controlado en la producción del cultivo del tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) bajo riego localizado. *Agricultura andina* 14:31-48.
- Rodríguez, D., E.; Salcedo, P., E.; Rodríguez, M., R.; González, E., D. R. y Mena, M., S.** 2013. Rehuso de Tezontle: Efecto en sus características físicas y en la producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Terra* 31(4):275-284.

- Rojas, A., M.** 2009. Determinación del momento de riego mediante temperatura de la cobertura foliar en el cultivo de Jitomate bajo condiciones de invernadero. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 169p.
- Romero, E.; Rodríguez, A.; Razuri, L.; Suniaga, J. y Montilla, E.** 2009. Estimación de las necesidades hídricas del cultivo de pepino (*Cucumis Sativus* L.), durante las diferentes etapas fenológicas, mediante la tina de evaporación. Agricultura andina 16: 56-59.
- Saito, T.; Fukuda, N.; Iikubo, T.; Inai, S.; Fujii, T.; Konishi, Ch. y Euzura, H.** 2008. Effects of Root-volume restriction and salinity on the fruit yield and Quality of processing tomato. J. Japan Soc. Hort. Sci. 77(2):165-172.
- San Martín, H., C.; Ordaz, Ch., V. M.; Sánchez, G., P.; Beryl, C., L. Ma. T. y Borges, G., L.** 2012. Calidad de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) producido en hidropónia con diferentes granulometrías de tezontle. Agrociencia 46: 243-254.
- Savi, P.; Maio, I., A. y Ferraris, S.** 2011. Time-Domain Reflectometry (TDR) Technique for the Estimation of soil Permittivity. pp. 351-371. In. Dr. Burcu E. Ozkaraova Gungor (ed.). Principles, application and Assessment in Soil Science. In Tech. Torino Italy.
- Sistema de información agroalimentaria y pesquera (SIAP).** SAGARPA. Disponible en: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/> (Revisado el 30 de Diciembre de 2014).
- Sonneveld, C.; Voogt, W.** 2009. Plant nutrition of greenhouse crops. Springer. New York. 432p.
- Steiner, A., A.** 1961. A universal Method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. Plant and soil 15(2): 134-154.
- Steiner, A., A.** 1984. The universal solution. pp. 633-649. In. Proceedings of 6<sup>th</sup> International Congress on Soilles culture. International Society of soiless culture. Launteren, The Netherlands.
- Stedle, E.** 2000. Water uptake by plant roots: an integration of views. Plant and soil 226:45-56.
- Tarjuelo, M-B, J. Ma.** 1999. El riego por aspersion y su tecnología. Ediciones Mundi-Prensa. 2<sup>a</sup> ed. España. 569p.
- Thorne, D., W. y Peterson, H., B.** 1984. Técnica de riego: Fertilidad y explotación de los suelos. Traducción de Jose Luis Lepe. 2<sup>a</sup> ed. McGraw-Hill. México. 496p.

- Topp, G., C.; Davis, J., L. y Annan, A., P.** 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission line. *Water Resources Research* 16:574–582.
- Trejo, T., L. I.; Ramirez, M., M.; Gómez, M., F. C.; García, A., J. C.; Baca, C., G. A. y Tejeda, S., O.** 2013. Evaluación física y química de tezontle y su uso en la producción de tulipán. *Revista Mexicana de ciencias agrícolas* 5:863-876.
- Valenzuela, C.; Della Maggiora, Echarte, L.; Cambareri, M. y Polizzi, M.** 2009. Evapotranspiración y eficiencia del uso de agua en intercultivos Maíz-Soja vs cultivos puros. *Meteorológica* 34(2):29-37
- Vargas, T., P.; Castellanos, R., J. Z.; Muñoz, R., J. de J.; Sánchez, G., P.; Tijerina, Ch., L.; López, R., R. M. Martínez, S., C. y Ojodeagua, A., J. L.** 2008. Efecto del tamaño de partícula sobre algunas propiedades físicas del tezontle de Guanajuato, México. *Agricultura técnica en México* 34(3): 323-331.
- Velasco, C., T.; Aranda G, I., Feito, D., I.; Ortega, L., U.; Alia, M., R. y Majada, G., J.** 2008. Control del estrés hídrico mediante TDR y su aplicación en programas de mejora genética. *Sociedad Española de ciencias forestales* 24:123-130.
- Vignolio, O., R., Maceira, N., O. y Fernández, O., N.** 1994. Efectos del anegamiento en invierno y verano sobre el crecimiento y la supervivencia de *Lotus tenuis* y *Lotus corniculatus*. *Ecología austral* 4: 19-28.
- Villegas, T., O. G.; Sánchez, G., P.; Baca, C., G. A.; Rodríguez, M., M. N.; Sandoval, V., M. y Cárdenas, S., E.** 2005. Crecimiento y estado nutricional de plántulas de tomate en soluciones nutritivas con diferente concentración de calcio y potencial osmótico. *Terra Latinoamericana* 23(1):49-56.
- Zamora, M., B. P.; Sánchez, G., P.; Volke, H., V. H.; Espinoza, V., D. y Galvis, S., A.** 2005. Formulación de mezclas de sustratos mediante programación lineal. *Interciencia* 30(6): 364-369.
- Zarate, N., B. H.** 2007. Producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) hidropónico con sustratos, bajo invernadero. Tesis de maestría. Instituto politécnico nacional. Santa Cruz Xoxocotlan, Oaxaca. México. 176p.

## 9 APENDICE

**Cuadro A- 1. Materia fresca y seca del sistema radical en plantas de Jitomate**

	Materia fresca (g.)				Materia seca (g.)			
	Días después de iniciados los tratamientos							
	21	42	63	84	21	42	63	84
	ES. 0-7.							
80% HAR	61.00 a*	52.92 a	54.69 a	57.78 a	5.78 a	5.25 a	6.27 a	9.91 a
50% HAR	53.25 ab	54.75 a	59.25 a	63.31 a	5.20 a	5.38 a	7.53 a	9.29 a
30% HAR	44.65 b	53.50 a	56.33 a	63.19 a	5.80 a	5.33 a	5.68 a	9.34 a
DMS	12.24	20.96	36.15	59.11	3.78	2.81	5.91	14.28
CV	10.65	17.98	29.32	44.35	31.20	24.39	42.02	69.23
	ES. 7-14.							
80% HAR	23.12 a	16.35 a	19.50 a	12.14 b	1.17 a	1.05 a	1.95 a	1.36 a
50% HAR	16.85 a	18.55 a	19.68 a	15.04 ab	0.97 a	1.13 a	1.45 a	1.67 a
30% HAR	16.85 a	16.20 a	18.65 a	21.88 a	1.00 a	1.00 a	1.20 a	2.40 a
DMS	10.96	15.51	9.87	8.99	0.91	1.18	1.66	2.53
CV	26.68	41.97	23.61	25.34	40.37	51.39	49.95	64.71
	ES. 14-21.							
80% HAR	16.5 a	13.45 a	8.55a	7.91a	0.72 a	0.75 a	0.65 a	0.49 a
50% HAR	14.02 a	15.05 a	10.43a	9.17a	0.45 a	0.53 a	0.73 a	0.72 a
30% HAR	16.95 a	14.13 a	11.70a	10.50a	0.82 a	0.63 a	0.80 a	1.15 a
DMS	8.49	6.86	4.55	6.43	0.47	0.55	0.74	1.56
CV	24.75	22.26	20.55	32.28	32.69	40.68	47.61	92.52

\* Valores con la misma literal son estadísticamente iguales, Prueba de Tukey con  $\alpha=0.05$ , DMS= Diferencia Mínima Significativa, CV= Coeficiente de variación. ES. 0-7=Capa de sustrato de 0 a 7 cm de profundidad, ES. 7-14=Capa de sustrato de 7 a 14 cm de profundidad, ES. 14-21 =Capa de sustrato de 14 a 21 cm de profundidad, HAR= Humedad aprovechable residual.

**Cuadro A- 2. Materia fresca y seca del tallo en plantas de Jitomate.**

	Materia fresca (g.)				Materia seca (g.)			
	Días después de iniciados los tratamientos.							
	21	42	63	84	21	42	63	84
80% HAR	135.38 a*	229.75 a	275.80 a	330.83 a	16.33 a	32.35 a	43.08 a	52.75 a
50% HAR	132.78 a	208.33 a	254.30 a	296.18 a	15.58 a	28.78 a	43.38 a	51.03 a
30% HAR	104.83 b	175.15 a	233.83 a	250.83 a	13.40 b	27.68 a	40.10 a	44.80 a
DMS	17.56	58.40	67.62	104.43	1.87	7.99	9.79	19.39
CV	6.51	13.16	12.24	16.45	5.71	12.45	10.69	18.04

\* Valores con la misma literal son estadísticamente iguales, Prueba de Tukey con  $\alpha=0.05$ , DMS= Diferencia Mínima Significativa, CV= Coeficiente de variación, HAR= Humedad aprovechable residual.

**Cuadro A- 3. Materia fresca y seca del fruto en plantas de Jitomate.**

	Materia fresca (g.)				Materia seca (g.)			
	Días después de iniciados los tratamientos.							
	21	42	63	84	21	42	63	84
80% HAR	246.38 a*	1124.30 a	2534.93 a	3668.88 a	15.80 a	66.45 a	151.66 a	263.80 a
50% HAR	266.58 a	1059.15 a	2308.90 ab	3091.45 a	16.58 a	69.80 a	121.38 a	260.70 a
30% HAR	231.93 a	951.60 a	1743.33 b	2360.60 b	15.98 a	61.58 a	97.15 a	208.45 b
DMS	170.93	453.12	775.34	615.20	7.87	25.32	66.24	50.84
CV	31.73	19.98	16.27	9.32	22.52	17.98	24.74	9.54

\* Valores con la misma literal son estadísticamente iguales, Prueba de Tukey con  $\alpha=0.05$ , DMS= Diferencia Mínima Significativa, CV= Coeficiente de variación, HAR= Humedad aprovechable residual.

**Cuadro A- 4. Producción de fruto en plantas de jitomate.**

	Numero de frutos.			
	Días después de iniciados los tratamientos			
	21	42	63	84
80% HAR	16.50 a*	39.75 a	48.75 a	59.00 ab
50% HAR	16.25 a	39.75 a	49.25 a	60.25 a
30% HAR	16.75 a	37.00 a	46.50 a	52.00 b
DMS	2.31	5.44	10.33	7.57
CV	6.46	6.46	9.89	6.11

\* Valores con la misma literal son estadísticamente iguales, Prueba de Tukey con  $\alpha=0.05$ , DMS= Diferencia Mínima Significativa, CV= Coeficiente de variación, HAR= Humedad aprovechable residual.

**Cuadro A- 5. Materia fresca y seca de la hoja en plantas de Jitomate.**

	Materia fresca (g.)				Materia seca (g.)			
	Días después de iniciados los tratamientos.							
	21	42	63	84	21	42	63	84
80% HAR	297.28 a*	459.43 a	522.18 a	601.05 a	36.55 a	55.72 a	66.73 a	68.83 a
50% HAR	296.28 a	430.85 a	530.50 a	550.78 a	35.98 a	50.35 a	65.98 a	89.10 a
30% HAR	215.53 b	366.60 a	417.65 b	451.50 a	28.83 a	46.58 a	55.69 a	64.56 a
DMS	68.64	132.70	94.18	184.96	7.76	15.58	17.17	55.18
CV	11.73	14.59	8.85	15.95	10.59	14.11	12.60	34.30

\* Valores con la misma literal son estadísticamente iguales, Prueba de Tukey con  $\alpha=0.05$ , DMS= Diferencia Mínima Significativa, CV= Coeficiente de variación, HAR= Humedad aprovechable residual.



**Cuadro A- 6. Área foliar en plantas de jitomate.**

	Área foliar (cm <sup>2</sup> ).			
	Días después de iniciados los tratamientos.			
	21	42	63	84
80% HAR	3606.25 a*	6266.74 a	8517.84 a	9858.72 a
50% HAR	3756.25 a	6001.22 a	8649.83 a	8609.06 ab
30% HAR	2901.25 b	5121.57 a	6676.41 b	7143.21 b
DMS	481.49	1322.00	1377.40	1919.80
CV	6.48	10.51	7.98	10.36

\* Valores con la misma literal son estadísticamente iguales, Prueba de Tukey con  $\alpha=0.05$ , DMS= Diferencia Mínima Significativa, CV= Coeficiente de variación, HAR= Humedad aprovechable residual.

**Cuadro A- 7. Materia fresca y seca de la flor en plantas de Jitomate.**

	Materia fresca (g.)				Materia seca (g.)			
	Días después de iniciados los tratamientos.							
	21	42	63	84	21	42	63	84
80% HAR	3.35 a*	1.28 a	0.88 a	0.75 a	0.48 a	0.23 a	0.10 a	0.08 a
50% HAR	3.38 a	1.30 a	1.13 a	0.53 a	0.48 a	0.18 a	0.08 a	0.03 a
30% HAR	2.35 a	1.13 a	1.00 a	0.55 a	0.33 a	0.15 a	0.08 a	0.03 a
DMS	1.96	1.10	1.19	0.34	0.28	0.33	0.17	0.04
CV	29.86	41.27	55.30	26.13	30.37	83.81	95.91	43.68

\* Valores con la misma literal son estadísticamente iguales, Prueba de Tukey con  $\alpha=0.05$ , DMS= Diferencia Mínima Significativa, CV= Coeficiente de variación, HAR= Humedad aprovechable residual.

**Cuadro A- 8. Materia fresca y seca de las podas en plantas de Jitomate.**

	Materia fresca (g.)				Materia seca (g.)			
	Días después de iniciados los tratamientos.							
	21	42	63	84	21	42	63	84
80% HAR	2.98 a	16.58 a	15.55 a	17.40 a	0.31 a	1.28 a	1.53 a	1.73 a
50% HAR	6.60 a	12.55 a	16.00 a	14.90 a	0.71 a	1.26 a	1.71 a	1.61 a
30% HAR	6.43 a	6.05 a	20.23 a	14.70 a	0.63 a	0.27 a	2.31 a	1.56 a
DMS	5.37	16.44	26.03	11.00	0.45	1.31	2.77	1.19
CV	46.45	64.65	69.54	32.36	38.44	64.85	69.15	33.92

\* Valores con la misma literal son estadísticamente iguales, Prueba de Tukey con  $\alpha=0.05$ , DMS= Diferencia Mínima Significativa, CV= Coeficiente de variación, HAR= Humedad aprovechable residual.

**Cuadro A- 9. Litros de agua agregados por tratamiento en periodos de 21 días más litros de agua agregados desde el trasplante hasta el inicio de tratamientos (8.45L.), en este caso se tomaron éstos valores como el valor de la evapotranspiración para el cálculo de la eficiencia en el uso del agua. HAR= Humedad Aprovechable Residual.**

	<b>Litros por planta</b>			
	Días después de iniciados los tratamientos.			
	21	42	63	84
80% HAR	22.39	27.60	28.87	29.60
50% HAR	23.18	26.32	23.80	23.42
30% HAR	24.32	22.56	21.28	21.49

**Cuadro A- 10. Eficiencia en el uso de agua para la producción de materia fresca ( $\text{kg m}^{-3}$ ) en periodos de 21 días. HAR= Humedad aprovechable residual.**

	<b>Litros</b>			
	Días después de iniciados los tratamientos.			
	21	42	63	84
80% HAR	36.256	74.055	133.472	185.637
50% HAR	35.150	72.961	153.526	204.153
30% HAR	26.930	75.019	131.831	170.178

**Cuadro A- 11. Eficiencia en el uso de agua para la producción de materia seca ( $\text{kg m}^{-3}$ ) en periodos de 21 días. HAR= Humedad aprovechable residual.**

	<b>Litros.</b>			
	Días después de iniciados los tratamientos.			
	21	42	63	84
80% HAR	3.559	6.310	10.577	15.768
50% HAR	3.381	6.378	11.621	20.921
30% HAR	2.813	6.828	10.694	17.818

**Cuadro A- 12. Horarios de riego para el tratamiento con 80%HAR, para cada día de tratamiento (año 2014)**

Día	Hora	Minutos	Día	Hora	Minutos	Día	Hora	Minutos	Día	Hora	Minutos
08/05	10:35	5		17:42	6		18:40	5		14:15	5
	17:15	5	22/05	09:20	7		19:50	4		15:55	5
09/05	11:00	5		12:20	6	04/06	08:56	5		18:39	5
	14:00	5		14:02	6		13:00	6		20:00	4
	17:00	5		15:32	5		14:10	4	15/06	08:54	5
10/05	09:20	5		18:50	5		16:30	6		11:57	5
	11:30	5	23/05	11:00	6		19:00	5		13:31	5
	14:45	5		13:30	5	05/06	09:45	5		14:50	5
	18:00	5		15:10	5		13:08	5		16:50	6
11/05	09:30	5	24/05	09:05	5		16:00	5		18:20	6
	13:45	5		12:10	5		19:25	6		20:10	6
	17:30	5		14:10	5	06/06	10:00	5	16/06	09:22	8
12/05	10:00	5		15:45	5		13:40	5		12:49	7
	13:00	5		17:50	6		17:01	5		14:30	7
	16:30	5	25/05	10:00	6		19:35	4		16:43	7
	18:30	5		13:05	5	07/06	12:35	5		18:29	5
13/05	08:00	5		16:10	5		15:15	5		19:29	4
	12:00	5	25/05	19:40	3		17:15	6	17/06	11:00	5
	16:10	5	26/05	09:30	4		19:30	4		12:37	5
14/05	08:00	5		12:05	4	08/06	09:30	5		14:51	5
	12:10	5		14:00	7		13:05	5		16:13	5
	16:00	5		15:50	7		15:30	6		17:42	5
	18:36	5		19:15	6		18:30	5		19:06	6
15/05	09:30	6	27/05	09:35	5	09/06	10:10	5	18/06	08:41	6
	13:40	6		13:55	6		12:55	5		11:56	6
	16:45	5		15:34	5		15:05	6		13:42	6
16/05	07:55	5		17:35	5		16:33	5		15:24	6
	12:15	5	28/05	09:05	5		18:13	5		16:50	5
	15:00	5		13:05	6		19:50	4		19:12	5
	16:33	5		15:36	8	10/06	09:38	5	19/06	09:00	7
	18:15	5		18:05	6		12:00	5		12:47	6
17/05	08:00	4	29/05	09:50	5		14:42	5		14:00	5
	14:37	6		11:55	5		17:05	7		15:19	5
	15:50	5		13:22	5		19:05	5		16:56	6
	17:30	5		14:48	6	11/06	08:37	5		18:26	5
	19:45	3		17:10	6		11:11	5	20/06	12:49	6
18/05	08:35	7	30/05	08:28	5		13:36	5		15:41	6
	13:20	5		12:10	5		15:25	6		19:17	5
	16:30	4		14:00	5		17:19	6	21/06	12:13	6
	18:50	5		19:30	4		19:00	5		14:03	5
19/05	09:40	7	31/05	09:31	5	12/06	09:12	5		15:43	7
	12:55	5		12:39	6		12:26	6		17:49	7
	14:00	8		15:05	6		14:25	5		19:36	6
	16:15	4		18:43	4		16:23	6	22/06	09:18	5
	17:45	5	01/06	09:10	5		17:55	6		12:07	5
20/05	09:40	8		12:00	7		19:58	5		13:29	6
	12:10	4		14:00	6	13/06	09:35	7		15:03	7
	13:36	4		15:25	6		11:55	5		16:36	7
	15:10	4	02/06	17:10	5		13:24	5		17:44	6
	16:20	6		18:42	5		14:58	6		18:52	6
	17:34	3		19:55	4		16:30	6			
	19:00	3	03/06	08:06	6		18:04	6			
21/05	09:35	7		10:30	4		19:47	5			
	12:17	5	03/06	14:15	5	14/06	09:25	5			
	15:35	6		16:45	6		12:19	5			

**Cuadro A- 12. Continuación.**

Día	Hora	Minutos	Día	Hora	Minutos	Día	Hora	Minutos	Día	Hora	Minutos
23/06	08:34	6		13:23	7	14/07	10:15	5		15:30	5
	13:00	5		16:16	7		12:35	5		17:30	6
	15:22	6		17:41	6		13:55	5	24/07	10:25	5
	16:39	5	04/07	08:18	6		15:50	5		12:30	5
	18:19	5		13:01	6		17:15	5		14:00	5
	19:47	5		15:32	6		19:00	5		16:15	5
24/06	10:55	5		18:31	4	15/07	10:00	5		18:00	6
	12:51	5	05/07	10:42	5		12:10	5	25/07	10:00	5
	15:19	6		14:00	5		13:10	5		12:45	5
	16:49	6		18:37	6		15:00	5		13:50	6
	18:33	5	06/07	09:55	5		18:00	5		15:00	6
	19:46	4		13:26	5	16/07	10:00	5	26/07	09:15	5
25/06	09:30	5	07/07	08:52	5		12:00	5		11:15	5
	12:37	5		12:35	5		13:10	5		13:20	5
	15:15	6		14:00	5		14:00	5		16:05	5
	17:05	5		15:40	5		16:00	5		18:10	5
26/06	08:44	6		19:10	5	17/07	09:10	5	27/07	09:35	5
	11:54	6	08/07	09:40	5		11:55	5		12:15	5
	15:39	7		12:00	5		13:05	5		14:20	5
	17:30	7		13:00	5		14:30	5		16:45	5
27/06	09:10	6		14:00	5		18:00	5		18:25	5
	12:02	6		16:00	5		19:10	5	28/07	10:15	5
	15:04	6		17:20	5	18/07	10:30	5		12:00	5
	16:29	7		19:28	4		12:25	5		13:55	5
	18:46	6	09/07	09:45	5		13:25	5		15:40	5
28/06	09:20	7		12:26	5		15:30	5		17:25	5
	12:36	5		14:05	5		18:20	5		19:10	5
	13:49	6		15:32	5		19:00	5			
	14:37	5		17:05	5	19/07	10:20	5			
	15:48	5		19:00	5		12:20	5			
	17:00	4	10/07	09:50	5		13:20	5			
	18:33	5		13:20	5		15:00	5			
29/06	09:45	5		15:20	5		16:00	5			
	12:27	5		17:35	5		17:20	5			
	14:19	6		19:00	5		19:00	5			
	15:29	5	11/07	09:45	5	20/07	09:00	5			
	17:16	5		12:00	5		12:00	5			
	19:09	4		13:30	5		13:08	5			
30/06	09:00	7		14:55	5		15:05	6			
	12:40	6		17:34	5		17:20	5			
	14:13	5		19:04	5		19:00	5			
	15:46	5	12/07	09:38	5	21/07	09:55	5			
	19:18	5		11:40	5		12:30	6			
01/07	08:42	7		13:05	5		13:45	5			
	11:56	5		14:20	5		15:30	5			
	14:10	5		15:50	5		16:30	5			
	16:07	5		17:00	5		19:00	5			
	17:04	5		19:00	5	22/07	09:55	5			
	18:37	5	13/07	09:40	5		12:15	5			
02/07	08:29	8		11:55	5		14:15	5			
	12:31	6		13:10	5		15:00	4			
	14:12	6		15:00	5		16:30	5			
	15:44	7		16:15	5	23/07	09:40	5			
	17:31	7		17:40	5		12:10	5			
03/07	10:00	8		19:20	5		13:50	5			

**Cuadro A- 13. Horarios de riego para el tratamiento con 50%HAR para cada día de tratamiento (año 2014)**

<b>Día</b>	<b>Hora</b>	<b>Minutos</b>	<b>Día</b>	<b>Hora</b>	<b>Minutos</b>	<b>Día</b>	<b>Hora</b>	<b>Minutos</b>
08/05	15:00	15	11/06	08:45	14	13/07	13:15	14
09/05	14:30	15		15:07	14		18:15	14
10/05	17:30	15		20:04	13	14/07	16:10	14
11/05	14:40	14	12/06	13:45	14	15/07	13:25	14
12/05	09:00	14		18:18	14	16/07	11:30	14
	17:00	15	13/06	11:05	13	17/07	09:45	14
13/05	16:40	15		15:42	14		18:20	14
14/05	11:20	16		19:48	13	18/07	13:40	14
	16:35	17	14/06	13:24	14	19/07	12:00	14
15/05	12:22	17		18:51	14		18:00	14
	18:10	16	15/06	12:05	13	20/07	12:30	14
16/05	13:50	14		16:36	14	21/07	10:00	14
17/05	08:15	13	16/06	09:30	16		17:12	14
	16:50	14		15:05	13	22/07	12:54	14
18/05	09:00	13	17/06	12:45	16	23/07	09:45	14
	16:26	12		17:28	15		17:40	14
19/05	09:45	12	18/06	12:25	14	24/07	14:04	14
	16:00	12		16:57	14	25/07	12:50	14
20/05	09:50	14	19/06	11:47	14	26/07	10:00	14
	15:15	11		15:29	14		16:45	14
	19:05	11	20/06	13:09	14	27/07	13:15	14
21/05	12:07	11	21/06	12:49	14	28/07	14:43	14
	16:15	11		17:38	13			
22/05	09:45	14	22/06	12:56	14			
	14:10	11		18:00	14			
	18:43	11	23/06	14:00	14			
23/05	12:45	11	24/06	09:15	15			
24/05	09:30	12		16:36	14			
	14:26	11	25/06	13:43	14			
	19:40	12	26/06	08:45	15			
25/05	16:20	14		17:41	13			
26/05	14:10	14	27/06	15:45	14			
27/05	09:40	14	28/06	11:42	14			
	17:11	14		16:59	14			
28/05	15:45	14	29/06	12:00	14			
29/05	10:15	14		19:11	14			
	15:08	12	30/06	16:25	14			
30/05	11:38	14	01/07	13:25	14			
	18:26	15		19:21	14			
31/05	16:46	14	02/07	15:55	14			
01/06	13:30	14	03/07	10:10	13			
02/06	10:00	14		17:45	13			
	16:45	16	04/07	14:37	14			
03/06	10:00	17	05/07	14:05	14			
	14:20	14	06/07	13:08	14			
04/06	09:00	14	07/07	14:30	10			
	19:10	12	08/07	10:00	14			
05/06	19:43	14		16:10	14			
06/06	14:50	14	09/07	13:20	14			
07/06	14:26	14		18:27	14			
08/06	09:35	16	10/07	14:10	14			
	18:13	14	11/07	12:32	14			
09/06	14:48	14		17:39	14			
	19:55	13	12/07	13:10	14			
10/06	14:45	14		18:03	14			

**Cuadro A- 14. Horarios de riego para el tratamiento con 30%HAR, por cada día de tratamiento, los días sin datos no se aplicó riego (año 2014).**

<b>Día</b>	<b>Hora</b>	<b>Minutos</b>	<b>Día</b>	<b>Hora</b>	<b>Minutos</b>
09/05	14:00	19	28/06	17:17	20
11/05	12:35	18	29/06	17:30	20
12/05	09:30	19	30/06	18:47	19
13/05	08:30	19	01/07	18:08	19
14/05	14:15	19	02/07	18:02	21
15/05	10:20	19	03/07	18:51	18
16/05	15:05	19	05/07	12:17	19
17/05	15:30	19	06/07	18:51	19
18/05	13:30	18	07/07	16:20	19
19/05	13:20	18	08/07	17:14	19
20/05	12:15	18	09/07	17:16	19
21/05	11:00	20	10/07	17:40	19
	15:53	18	11/07	17:15	19
22/05	13:07	19	12/07	15:55	19
23/05	11:21	19	13/07	15:55	19
24/05	12:15	19	14/07	16:30	18
	19:20	18	15/07	18:15	19
25/05	00:00	0	17/07	10:00	19
26/05	09:35	19	18/07	12:05	19
27/05	09:55	19	19/07	13:00	19
	19:10	19	20/07	12:48	19
28/05	17:18	19	21/07	12:35	18
29/05	14:25	18	22/07	13:10	19
30/05	13:39	19	23/07	13:20	19
31/05	17:00	19	24/07	14:20	19
01/06	16:55	19	25/07	13:15	19
02/06	16:08	19	26/07	12:10	19
03/06	14:40	19	27/07	12:15	19
04/06	12:30	19	28/07	12:30	19
05/06	11:45	20			
06/06	13:20	19			
07/06	16:15	19			
08/06	17:05	21			
09/06	16:45	19			
10/06	16:25	19			
11/06	15:30	19			
12/06	14:02	19			
13/06	11:15	20			
	16:35	19			
14/06	14:00	19			
15/06	11:26	21			
	18:36	20			
16/06	15:15	17			
17/06	14:01	19			
18/06	12:04	21			
19/06	11:00	22			
	19:25	19			
20/06	08:30	18			
21/06	17:02	19			
22/06	16:40	19			
23/06	16:09	19			
24/06	17:00	20			
25/06	17:46	20			
26/06	18:07	20			
27/06	18:17	19			