



*“Enseñar la explotación de la tierra,
No la del hombre”*

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua

**ESTRATEGIAS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DEL USO DE AGUA Y FERTILIZANTES
EN EL CULTIVO DE TOMATE (*Lycopersicon Esculentum Mill.*) EN INVERNADERO**

TESIS

COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA**

PRESENTA:

NADIA BRIGITTE SANABRIA MÉNDEZ

Noviembre de 2013

Chapingo, Texcoco, Estado de México



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
ORIGINA DE EXAMENES PROFESIONALES



**ESTRATEGIAS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DEL USO DE AGUA Y
FERTILIZANTES EN EL CULTIVO DE TOMATE (*Lycopersicon Esculentum*
Mill.) EN INVERNADERO**

Tesis realizada por **Nadia Brigitte Sanabria Méndez** bajo la dirección del
Comité indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para
obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA,
ORIENTACIÓN USO INTEGRAL DEL AGUA.**

DIRECTOR: _____



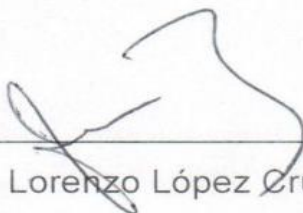
Dr. Federico Félix Hahn Schlam

ASESOR: _____



Dr. Ramón Arteaga Ramírez

ASESOR: _____



Dr. Irineo Lorenzo López Cruz

DEDICATORIA

A Díos porque le debo todo lo que soy hoy, y por las incontable oportunidades que me ha dado.

A la mujer extraordinaria que me dio la vida mi Madre Rosa Méndez Quintero, a quien le estaré eternamente agradecida por todo lo que ha hecho y sigue haciendo por mí.

A mí Compañero-Esposo Marlío Bedoya Cardoso por su apoyo incondicional y porque si no fuese tan emprendedor, soñador y tan perseverante quizá no estaría aquí en éste momento.

A mis Hermanos y a mi sobrino a quienes amo Yenifer Sanabria Méndez, Eduardo Sanabria Méndez y Juan David Falla Sanabria.

A mi Abuelita Albenís, a mis tías Zunny y Viela, y a todos mis familiares quienes siempre me apoyaron en todas mis decisiones.

A un gran amigo Mexicano René Ramírez Ramírez, por su invaluable colaboración y apoyo.

A Ana María Toro Trujillo y Fernando González Leiva "Los Langos" por su apoyo y compañía.

Sinceramente,

Nadia Brigitte

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado durante mis estudios de Maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo por darme la oportunidad de realizar mis estudios.

Al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua por el apoyo brindado durante toda la maestría.

Al Dr. Eugenio Romanchick K, por su confianza y apoyo.

Al Dr. Federico F. Hahn Schlam, por su experiencia y su apoyo en la dirección de este trabajo de investigación.

Al Dr. Ramón Arteaga Ramírez por su asesoramiento y disposición a favor del presente proyecto.

Al Dr. Irineo López Cruz por sus revisiones y recomendaciones, sin duda enriquecieron la presente investigación.

A los trabajadores del Campo Experimental Tlapeaxco por su valiosa colaboración, especialmente a Don Nacho, a Don Roberto y a Don José Luis por su invaluable apoyo.

A todos los profesores de la Universidad Autónoma Chapingo que contribuyeron con su conocimiento en mi formación.

A todo el personal administrativo y operativo que contribuyó de alguna forma con este logro.

DATOS BIOGRÁFICOS DEL AUTOR

La autora del presente trabajo de tesis es originaria de Colombia, nacida el 17 de agosto de 1984 en el municipio de Gigante en el departamento del Huila. En julio de 2002 ingresó a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Surcolombiana a realizar estudios de Ingeniería Agrícola, obteniendo el título como Ingeniero Agrícola el 27 de Octubre de 2007.

En el ámbito profesional trabajó con la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia desempeñando el cargo de Extensionista en el municipio de Gigante en el departamento del Huila durante el periodo comprendido entre febrero de 2008 y julio de 2011.

En agosto de 2011 ingresó al Programa de Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua en la Universidad Autónoma Chapingo, para realizar estudios de Maestría.

RESUMEN

Con el objetivo de evaluar el crecimiento, rendimiento y calidad del cultivo de tomate bajo diferentes estrategias para mejorar el uso de agua y fertilizantes, se desarrollaron tres experimentos en los periodos de verano-otoño del año 2012 y 2013. Durante el primer experimento diferentes frecuencias de riego y conductividad eléctrica de la solución nutritiva fueron aplicadas al cultivo de tomate evaluando el rendimiento y calidad de frutos. En el segundo experimento se evaluó el rendimiento y calidad de frutos con el método de riego a tiempos y método de riego por radiación manteniendo el drenaje en 10, 20 y 30%. En el tercer experimento se comparó el uso de sistemas cerrados (SC) y sistemas abiertos (SA) para determinar su efecto sobre el rendimiento, calidad de frutos y el uso eficiente de agua y fertilizantes. Aunque no se presentaron diferencias estadísticas significativas respecto a los índices de crecimiento y rendimiento en el primer experimento, el tratamiento con alta CE y frecuencia de riego alta obtuvo un rendimiento de 273.7 Ton/ha/año, sin embargo la cantidad de frutos vendibles disminuyó 45% debido a problemas de pudrición apical. En el segundo experimento en el tratamiento con riego por radiación con 20% de drenaje se presentó alto rendimiento 285.3 Ton/ha/año, mayor peso promedio de frutos y 95% de frutos vendibles. Igualmente la eficiencia en uso del agua fue mejor produciendo 23.21 g de frutos por litro de agua de riego. En el tercer experimento el sistema cerrado presentó un ahorro de agua de 37.35% y de fertilizantes de 36.91% respecto al sistema abierto. Además de mayor rendimiento 271.3 Ton/ha/año, mayor peso promedio de frutos y mejor eficiencia en el uso del agua produciendo 18.79 g de fruto por litro de agua de riego.

Palabras claves: Cultivo sin suelo, métodos de fertiriego, conductividad eléctrica, solución nutritiva, frecuencia de riego.

ABSTRACT

In order to evaluate growth, yield and quality of tomato crop under different strategies to improve the use of water and fertilizer three experiments were carried out in the summer-autumn periods of 2012 and 2013. During the first experiment, different frequencies of irrigation and electrical conductivities of the nutrient solution were applied to the tomato crop to evaluate the yield and fruit quality. The second experiment evaluated the yield and quality of tomatoes with the timing irrigation method and with radiation irrigation method control in order to obtain 10, 20 and 30 % drainage. The third experiment compared the use of closed systems (CS) and open systems (OS) to determine their effect on yield, fruit quality and water and fertilizer efficient use. Although there were no statistically significant differences with respect to growth and yield in the first experiment, the treatment with high EC and high irrigation frequency, obtained a yield of 273.7 Ton/ha/yr, although the amount marketable fruit decreased 45% due to blossom end rot problems. In the second experiment the treatment with radiation control irrigation having 20 % drainage gave the highest yield 285.3 Ton/ha/yr, fruit weight average was higher, and 95% of fruit was marketable. Likewise the efficiency use of water was improved to produce 23.21 g of fruit per liter of water irrigation. In the third experiment the closed system provided a saving of 37.35 % of water and 36.91 % of fertilizer over the open system. Furthermore showed a higher yield of 271.3 Ton/ha/yr in four months of crop, a higher average fruit weight and greater efficiency in the use of water to produce 18.79 g of fruit per liter of water irrigation.

Key Words: Soilless culture, fertigation methods, electrical conductivity, nutrient solution, irrigation frequency.

ÍNDICE

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	IV
DATOS BIOGRÁFICOS DEL AUTOR	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
ÍNDICE.....	VIII
ÍNDICE DE CUADROS.....	XII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIV
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo General	4
1.2 Objetivos Específicos.....	4
1.3 Hipótesis	5
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1 Origen y Descripción del Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.).....	6
2.2 Agricultura Protegida en México	7
2.3 Importancia Económica del Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.) .	10
2.4 Requerimientos Climáticos del Tomate	12
2.4.1 Temperatura.....	12
2.4.2 Humedad Relativa.....	13
2.4.3 Luz	14
2.4.4 Dióxido de Carbono CO ₂	15
2.4.5 Movimiento del Aire.....	15
2.5 Cultivos Sin Suelo.....	16
2.5.1 Clasificación de Cultivo Sin Suelo en Función del Drenaje	16
2.6 Diferencias entre los Sistemas Recirculantes y Abiertos	20
2.6.1 Control.....	20
2.6.2 Eficacia de uso o eficiencia	20
2.7 Recirculación	21

2.7.1	Factores que Afectan la Recirculación	22
2.8	Solución Nutritiva	27
2.8.1	Efecto del PH.	27
2.8.2	Efecto de la Conductividad Eléctrica.	28
2.9	Objetivo del Riego	31
2.10	Métodos de Fertiriego.....	33
2.10.1	Asociados a la Planta	33
2.10.2	Asociados al Clima	35
2.10.3	Asociados al sustrato	36
2.10.4	Asociados al Sistema.....	37
2.11	Métodos de Desinfección del Drenaje	38
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	43
3.1	Experimento 1.....	44
3.1.1	Localización del Experimento.....	44
3.1.2	Características del invernadero.....	44
3.1.3	Material Genético	45
3.1.4	Manejo Agronómico	45
3.1.5	Diseño Experimental	47
3.1.6	Manejo de Solución Nutritiva y Riego.....	48
3.1.7	Evaluación de Parámetros Climáticos.....	52
3.1.8	Evaluación de la solución nutritiva lixiviada.....	52
3.1.9	Crecimiento de las Plantas.....	53
3.1.10	Peso de Frutos, Sólidos Solubles y Rendimiento	54
3.2	Experimento 2.....	54
3.2.1	Diseño Experimental	56
3.2.2	Manejo de Solución Nutritiva y Riego.....	57
3.2.3	Crecimiento de las Plantas.....	60
3.2.4	Peso de Frutos, Sólidos Solubles y Rendimiento.....	60
3.3	Experimento 3.....	62
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	66
4.1	Experimento 1.....	66

4.1.1	Comportamiento de la Temperatura y Humedad Relativa	66
4.1.2	Comportamiento del volumen y conductividad eléctrica del drenaje 68	
4.1.3	Índices de Crecimiento.....	72
4.1.4	Rendimiento y sus Componentes.....	74
4.1.5	Sólidos solubles totales	77
4.2	Experimento 2.....	79
4.2.1	Variables Ambientales.....	79
4.2.2	Comportamiento del volumen y conductividad eléctrica del drenaje	81
4.2.3	Índices de Crecimiento.....	88
4.2.4	Rendimiento y sus Componentes.....	89
4.2.5	Eficiencia en el Uso de Agua	95
4.3	Experimento 3.....	98
4.3.1	Índices de Crecimiento	99
4.3.2	Rendimiento y sus componentes.....	101
4.3.3	Uso Eficiente de Agua y fertilizantes.....	102
4.3.4	Funcionamiento del Sistema Cerrado.....	105
5.	CONCLUSIONES	106
	RECOMENDACIONES.....	109
	LITERATURA CITADA	111
	Apéndice A. Cálculo de frecuencia y dotación de riego a tiempos experimento 1.	118
	Apéndice B. Programa en lenguaje C para microcontrolador Atmel 80c51	121
	Apéndice C. Diagrama de tiempos riego a tiempos	126
	Apéndice D. Cálculo de Radiación PAR acumulada y dotación de riego.....	128
	Apéndice E. Código en LabView de adquisición de radiación y control de riego por integral de radiación PAR	129
	Apéndice F. Diagrama electrónico placa de relevadores.....	132
	Apéndice G. Código en LabView de almacenamiento y graficado de lecturas de sensores	133
	Apéndice H. Análisis de varianza experimento 1	134

Apéndice I. Análisis de varianza experimento 2.....	141
Apéndice J. Análisis de varianza experimento 3.....	146
Apéndice K. Fotografías del trabajo de investigación	149

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Principales países productores de tomate	10
Cuadro 2. Superficie, producción y exportación de tomates en invernadero ...	11
Cuadro 3. Industria del tomate fresco en Norteamérica. Comparativo cultivados en campo e invernaderos, 2003 ¹	12
Cuadro 4. Comparación de trabajos en el ahorro de agua y fertilizantes, y su efecto en el rendimiento usando sistemas cerrados con diferentes sustratos en plantas de tomate.	19
Cuadro 5. Distribución de tratamientos experimento 1	48
Cuadro 6. Composición de la solución nutritiva	49
Cuadro 7. Fuentes fertilizantes para preparar y ajustar la solución nutritiva.....	49
Cuadro 8. Distribución de tratamientos experimento 2	56
Cuadro 9. Comparaciones de medias para el porcentaje drenado en las dos etapas de cultivo evaluadas.	69
Cuadro 10. Comparaciones de medias para conductividad eléctrica del drenaje para dos etapas de cultivo evaluadas.	72
Cuadro 11. Comparaciones de medias para índices de crecimiento	74
Cuadro 12. Comparación de medias para peso de frutos y rendimiento	77
Cuadro 13. Comparación de medias para sólidos solubles totales.	78

Cuadro 14. Comparación de medias para volumen drenado y CE del drenaje	87
Cuadro 15. Comparación de medias para índices de crecimiento.....	89
Cuadro 16. Comparación de medias para indicadores de producción experimento dos	91
Cuadro 17. Comparación de medias para agua aplicada y agua absorbida.....	97
Cuadro 18. Ahorro de agua y fertilizantes asumiendo la recirculación del volumen drenado	97
Cuadro 19. Comparación de medias para índices de crecimiento.....	100
Cuadro 20. Comparación de medias para indicadores de producción experimento tres	102
Cuadro 21. Ahorro de agua y fertilizantes usando sistemas cerrados (SC)....	104
Cuadro 22. Concentración de nutrimentos para solución nutritiva lixiviada	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de principales cultivos bajo agricultura protegida en la república Mexicana. Fuente: SAGARPA, 2012.....	9
Figura 2. Entradas, salidas, y factores intrínsecos en sistemas abiertos y cerrados. Fuente: Urrestarazu, 1996.	16
Figura 3. Esquema de las pretensiones, problemas y soluciones en forma de recursos en los sistemas cerrados. Fuente: Urrestarazu y Salas, 2004.	21
Figura 4. Esquema de la influencia de la calidad de las aguas y otros factores que afectan a los resultados y posibilidad de recirculación en la práctica de la disolución nutritiva. Fuente: Urrestarazu y Salas, 2004.	26
Figura 5. Niveles de referencia recomendados a aportar por los fertilizantes a la conductividad eléctrica (dS m^{-1}) de la disolución nutritiva final en función de la de la calidad de partida del agua de riego disponible, así como su relación con algunos parámetros del manejo del fertiriego y la producción esperada. Fuente: Salas y Urrestarazu. 2004.	29
Figura 6. Vista Exterior del Invernadero.....	45
Figura 7. Semillero (a) y vista panorámica del experimento 1 (b)	46
Figura 8. Estructuras metálicas con canaletas para recolección de drenaje	47
Figura 9. Tanques de 1000 litros para preparación de solución (a), Tambo de 200 litros desde donde se distribuía el riego (b), Tubería que transportaba la	

solución de tanques de 1000 litros a tambos de 200 litros (c), Microcontrolador y placa de relevadores para control de riego (d)	50
Figura 10. Vista frontal de la distribución de los tratamientos	51
Figura 11. Termo higrómetro digital	52
Figura 12. Probeta de 1000 mL para medir volumen drenado (a), Medidor combinado de conductividad eléctrica y pH (b).....	53
Figura 13. Balanza para peso de los frutos (a), Refractómetro para determinar sólidos solubles (b).	54
Figura 14. Vista interior del invernadero experimento 2.....	55
Figura 15. Vista general del experimento 2	55
Figura 16. Vista frontal de la distribución de los tratamientos (a), Vista superior de distribución de los tratamientos experimento 2 (b).....	57
Figura 17. Diagrama electrónico sistema que detiene el riego por volumen drenado (a), recipiente con switch para detención de riegos (b), Sensor de radiación PAR (c), gráfica de integral radiación PAR en LabView (d).....	59
Figura 18. Diagrama tiempos para riego por radiación PAR para un día soleado, nublado y promedio	61
Figura 19. Medición de diámetro horizontal (a), Medición de diámetro vertical (b)	62
Figura 20. Sistema cerrado (recirculación de la solución nutritiva)	63

Figura 21. Sistema de recolección de drenaje (a), Sistema de desinfección de drenaje (b)	64
Figura 22. Temperatura máxima y mínima (a), humedad relativa máxima y mínima (b).....	67
Figura 23. Comportamiento del porcentaje drenado y de la CE del drenaje T1 (a), T3 (b), T2 (c) y T4 (d)	70
Figura 24. Comparación de número de ramas (a), número de hojas (b) y altura de la planta (c) por tratamiento.	73
Figura 25. Porcentaje de frutos vendibles y afectación por pudrición apical.....	75
Figura 26. Comportamiento de la temperatura (a) y la humedad relativa (b) durante el experimento	80
Figura 27. Comportamiento de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) ...	80
Figura 28. Comportamiento de la conductividad eléctrica del drenaje riego a tiempos (a) y riego por radiación (b)	82
Figura 29. Volumen drenado para día soleado (a), conductividad eléctrica del drenaje para día soleado (b), Volumen drenado para día nublado (c), conductividad eléctrica del drenaje para día nublado (d).....	84
Figura 30. Conductividad eléctrica del sustrato y de la solución nutritiva lixiviada para dos días de cultivo.	86
Figura 31. Porcentaje de drenaje para riego a tiempos (a) y Porcentaje de drenaje para riego por radiación (b).....	88

Figura 32. Frutos totales, vendibles y afectados por pudrición apical.....	90
Figura 33. Distribución de tamaño de frutos para riego a tiempos (a), para riego por radiación (b).....	94
Figura 34. Eficiencia del uso del agua para cada tratamiento	95
Figura 35. Comportamiento del porcentaje y conductividad eléctrica del drenaje para sistema cerrado	99
Figura 36. Plantas del sistema abierto colocadas sobre el suelo	100
Figura 37. Eficiencia del uso del agua para cada sistema	103

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la agricultura tiene el reto de manejar el agua y los nutrientes de manera que se maximicen los beneficios en la producción. La combinación exacta de agua y nutrientes es un requisito previo para obtener un mayor rendimiento y productos de buena calidad.

En esta búsqueda, diferentes autores han estudiado técnicas de riego, y de cultivo que permiten optimizar los recursos agua y fertilizantes y que mantengan o aumenten la productividad. Hebbar *et al.*, (2003) encontraron que la respuesta del cultivo a la aplicación de fertilizantes a través del riego por goteo ha sido excelente y frecuentes aplicaciones de nutrientes han mejorado la eficiencia del uso de fertilizantes. Bhat y Sujatha, (2008) determinaron que el método de aplicación de fertilizantes también es importante en la mejora de la eficiencia en el uso de los nutrientes.

De igual forma, Flores *et al.*, (2006) mencionan que la producción bajo invernadero tiene varias ventajas sobre la producción a campo abierto: mayor eficiencia en el uso de agua, tierra y fertilizantes, ampliación y ajuste de la temporada de siembra y cosecha, dependiendo de la demanda del mercado.

Actualmente en México se cultivan aproximadamente 11700 ha de tomate rojo bajo condiciones de agricultura protegida. Se emplean microtúneles con cubierta flotante, casa sombra e invernaderos, acompañados de sistemas de riego localizado ya sea para cultivo en suelo o en hidroponía (Pérez y Castro, 2011).

Costa y Giacomelli (2005) afirman que aunque México tiene un gran potencial para el desarrollo de la industria de hortalizas en invernadero a si mismo tiene un gran potencial para el fracaso, debido a que la tecnología de producción en invernadero mal dirigida puede dar lugar a desastres económicos, en parte por las expectativas irrazonables de calidad y rendimiento. Por lo que recomiendan conocer las expectativas de producción basados en el nivel de tecnología seleccionado, el cual debe escogerse dependiendo los requerimientos del cultivo, las características del clima, el capital disponible para la inversión en tecnología y la experiencia laboral.

El cultivo más importante que se establece bajo invernadero es el jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) también conocido como tomate rojo en sus diferentes tipos (saladette o roma, bola, cherry y uva) (Osuna, 2011).

Costa y Giacomelli (2005) mencionan que en la actualidad la producción de tomate (bola, cherry y saladette) representa el 70% de todos los cultivos de hortalizas en invernadero en México.

Mahajan y Singh (2006) determinaron que el uso de invernaderos es la mejor alternativa para garantizar la calidad y cantidad de la producción de tomate, porque además de un mayor rendimiento, la producción es también libre de polvo, insectos, enfermedades y plagas.

Sin embargo pese a la gran importancia que tiene el cultivo de tomate en México, pocos estudios se han realizado sobre los requerimientos hídricos de este cultivo en invernadero. Willits (2003) manifiesta que aunque existen diversos estudios para determinar los requerimientos de riego del tomate a campo abierto, su estimación en ambientes cerrados es dispersa y limitada.

Esta situación se complica aún más, si se tiene en cuenta lo mencionado por Flores *et al.*, (2006), quienes afirman que los estudios en condiciones de invernadero se han realizado para sistemas productivos de Europa, Estados Unidos y Canadá, donde usualmente se tienen bajas densidades de plantas (<3 plantas m^{-2}), diferentes de las densidades utilizadas en el centro de México (>4 plantas m^{-2}).

En éste sentido se tienen diferentes técnicas que además de permitir el ahorro de agua y fertilizantes, aumentan la productividad y calidad de los cultivos que bajo este esquema se producen, tales como invernaderos, fertirrigación, acolchado de suelo, y cultivo de plantas sin suelo o hidroponía. Adicionalmente, debido a la importancia que ha cobrado la protección del medio ambiente, los

sistemas de cultivos sin suelo cerrados (ó sistemas recirculantes) cobran una gran importancia.

Los sistemas cerrados presentan ventajas importantes, respecto a los sistemas abiertos: ahorro de agua y fertilizantes, menor contaminación por nitrógeno y fósforo en ríos, lagos, mantos freáticos y mares (Páez *et al.*, 2007; Giuffrida y Leonardi, 2009; Nakano *et al.*, 2010; Massa *et al.*, 2010; Pardossi *et al.*, 2009).

Con base en lo anterior, el propósito de la presente investigación fue determinar para el cultivo de tomate, el método de riego más eficiente para minimizar el uso del agua y fertilizantes, incrementando el rendimiento y calidad del cultivo. También se utilizó un sistema de recirculación de la solución nutritiva en un sistema de producción de tomate en invernadero.

1.1 Objetivo General

Evaluar diferentes estrategias para mejorar el uso eficiente de agua y fertilizantes y determinar su efecto sobre el crecimiento, rendimiento y calidad del cultivo de tomate.

1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Evaluar diferentes frecuencias de riego y concentraciones de la solución nutritiva y determinar su efecto sobre el crecimiento y rendimiento del cultivo de tomate.

- ✓ Determinar el método de riego (riego temporizado o por radiación) más eficiente para mantener o mejorar la calidad y productividad del cultivo de tomate.
- ✓ Evaluar el efecto de recircular la solución nutritiva sobre el crecimiento, la calidad y productividad del cultivo de tomate.
- ✓ Comparar el rendimiento de los sistemas hidropónicos abiertos respecto a los sistemas cerrados.
- ✓ Determinar el ahorro de agua y elementos nutritivos primarios que se logra al recircular la solución nutritiva.

1.3 Hipótesis

A través de la recirculación de la solución nutritiva lixiviada bajo condiciones de invernadero, se mantiene el rendimiento y calidad del fruto del tomate.

Se logra reducir el uso de agua y fertilizantes sin afectar los rendimientos con la reutilización de la solución nutritiva drenada y realizando los riegos por el método de integración de la radiación PAR.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Origen y Descripción del Tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.)

El tomate o jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) especie cultivada originaria de América y al parecer domesticado por primera vez en México, es la hortaliza más importante en numerosos países y su popularidad aumenta constantemente, debido a su alto nivel de consumo, por lo que constituye una de las principales fuentes de vitaminas y minerales (Nuez, 1999).

El tomate es una planta dicotiledónea perteneciente a la familia de las solanáceas, perenne, de porte arbustivo que se cultiva como anual. La planta puede desarrollarse en forma rastrera, semierecta o erecta. La ramificación es generalmente simpodial, con lo que los ejes sucesivos se desarrollan a partir de la yema axilar del eje precedente y la yema terminal da lugar a la inflorescencia o a ramas abortivas. Las hojas son compuestas, imparipinadas con 7 a 9 foliolos y una filotaxia de 2/5 en espiral. La inflorescencia es un dicasio compuesto generalmente por 4 a 12 flores. El fruto es una baya de forma globular, ovoide o aplastada cuyo peso oscila, según la variedad entre 5 y 500g. Cuando la planta crece directamente de la semilla sin sufrir trasplantes desarrolla una potente raíz principal que le permite adaptarse a ecosistemas

semidesérticos, pero cuando la raíz principal se daña como por ejemplo a consecuencia del trasplante, se desarrolla un sistema de raíces laterales adventicias (Nuez, 1999).

La planta se desarrolla bien en un amplio rango de latitudes, tipos de suelo, temperaturas y métodos de cultivo, pero se desarrollan mejor en ambientes cálidos, con buena iluminación y drenaje. La exposición prolongada a temperaturas inferiores a 10 °C, una iluminación diurna inferior a 12 h, un drenaje deficiente o un abonado nitrogenado excesivo le afectan desfavorablemente. El fallo en el cuajado por polinización deficiente es uno de los problemas más comunes en el cultivo del tomate (Nuez, 1999; Heuvelink 1996).

2.2 Agricultura Protegida en México

La agricultura protegida es aquella que se realiza bajo métodos de producción que ayudan a controlar diversos factores del medio ambiente. Ello permite minimizar las restricciones que las malas condiciones climáticas ocasionan en los cultivos (SAGARPA, 2012).

SAGARPA, (2012) menciona las ventajas de este sistema de producción:

- ✓ Generación de ocho empleos directos por hectárea.
- ✓ Producción de cultivos inocuos.

- ✓ Incremento de hasta cinco veces la producción con relación a campo abierto (tomate: 70 ton ha⁻¹ a campo abierto vs 350 ton ha⁻¹ con agricultura protegida).
- ✓ Producción durante todo el año, aprovechando las ventanas de mercado para obtener precios competitivos.
- ✓ Ahorro de agua por kilo de tomate producido; en tomate producido en campo abierto se utilizan 89 litros por kilogramo de tomate producido y en hidroponía 20 litros.
- ✓ Es posible aprovechar suelos con problemas de degradación o químicos.
- ✓ Utilización de sustratos para reducir la contaminación al medio ambiente.

El 50% de la superficie con agricultura protegida se concentra en cuatro estados: Sinaloa (22%), Baja California (14%), Baja California Sur (12%) y Jalisco (10%). Los principales cultivos que se producen bajo agricultura protegida son el tomate (70%), pimiento (16%), pepino (10%) (Figura 1). En los últimos años se ha intensificado la diversificación de cultivos como la papaya, fresa, chile habanero, flores y plantas aromáticas (SAGARPA, 2012).

Las estructuras que se utilizan en la horticultura protegida, además de los invernaderos, son la malla sombra (casa sombra), las cubiertas flotantes (mantas térmicas), los macro túneles y los micro túneles. Estas estructuras de protección generalmente se acompañan de sistemas de riego localizado (fertirrigación), cultivo sin suelo (sustratos) o hidroponía. En general, los

invernaderos constituyen 44 % y la malla sombra 51 % de la superficie total (Juárez *et al.*, 2011).

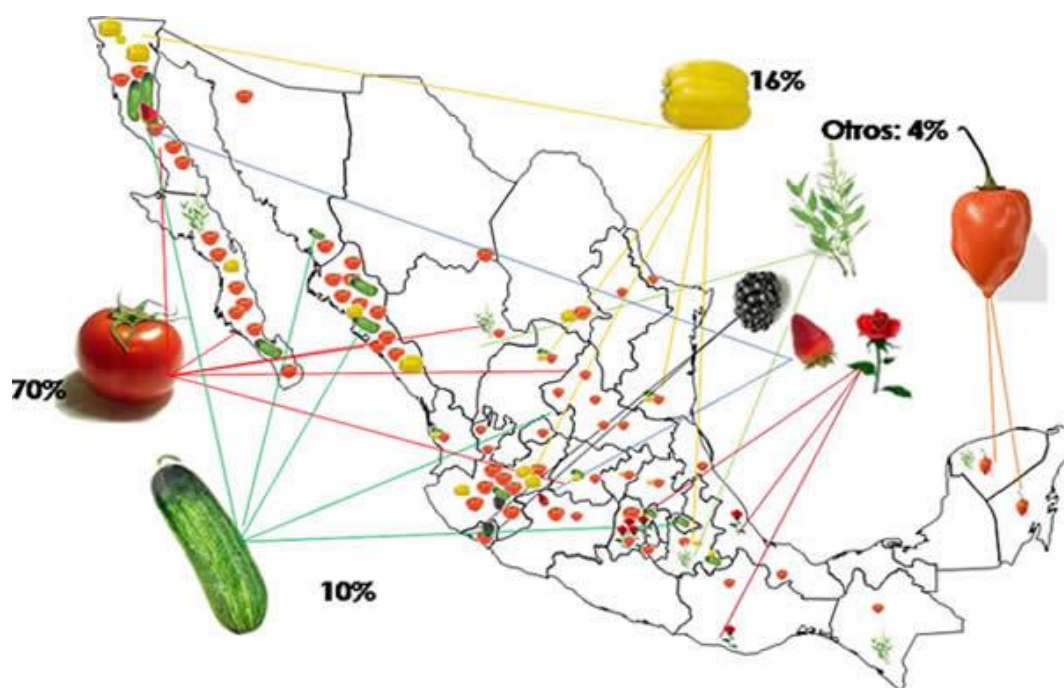


Figura 1. Distribución de principales cultivos bajo agricultura protegida en la república Mexicana. Fuente: SAGARPA, 2012.

La superficie total sembrada de tomates ha mostrado una tendencia a disminuir, porque los productores están experimentando limitaciones de expansión. En 1990, la superficie plantada fue aproximadamente de 85,500 hectáreas. Sin embargo, en 2000 la superficie plantada fue aproximadamente de 75,800 hectáreas y para 2010 la superficie plantada se espera cerca de 58,300 hectáreas. A pesar de la menor área sembrada, los rendimientos han

aumentado debido a los avances tecnológicos y en especial con el uso de la agricultura protegida (invernaderos y casa sombras) (Flores y Ford, 2010).

2.3 Importancia Económica del Tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.)

En el periodo comprendido entre el año 2007 y 2009 México ocupó el décimo lugar entre los países productores de tomate; sin embargo en el año 2011 fue desplazado al undécimo lugar por Uzbekistán (Cuadro 1).

En México el tomate es considerado una hortaliza de gran valor económico, generadora de empleos y divisas. Su participación en la balanza agropecuaria es fundamental en la generación de divisas. En el año 2012, el tomate ocupó 15.40 % del total de las exportaciones agropecuarias (INEGI, 2013).

Cuadro 1. Principales países productores de tomate

Lugar	País	Producción Año 2011 (Ton)
1	China	48,450,000
2	India	16,826,000
3	E.U.A	12,526,070
4	Turquía	11,003,433
5	Egipto	8,105,263
6	Irán	6,824,298
7	Italia	5,950,215
8	Brasil	4,416,652
9	España	3,864,120
10	Uzbekistán	2,585,000
11	México	2,435,788
12	Federación de Rusia	2,200,590
13	Ucrania	2,111,600
14	Nigeria	1,504,670
15	Túnez	1,284,000

Fuente: Elaboración propia con datos de FAOSTAT, 2013

México es el mayor productor y consumidor per cápita de tomates frescos en América del Norte. Por lo tanto, la industria del tomate fresco y mercado interno ocupa un lugar destacado en la dinámica de la industria de tomate fresco en América del Norte. Las exportaciones son muy importantes para la industria del tomate mexicano. En 2003, México exportó 46 por ciento de los tomates frescos, y más del 90% fue a los Estados Unidos, y la mayoría del resto a Canadá (Cook y Calvin, 2005).

El sistema de producción bajo condiciones de agricultura protegida ha presentado un elevado crecimiento en los últimos años (25 % anual) (Juárez *et al.*, 2011). En el Cuadro 2 se muestra el avance que tuvo la superficie de invernaderos de tomate entre 2000 y 2006.

Cuadro 2. Superficie, producción y exportación de tomates en invernadero

Concepto	Año						
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Superficie (ha)	450	665	864	950	1000	1020	1050
Producción (Ton)	54,000	86,450	120,960	148,300	160,000	168,300	179,000
Rendimiento (Ton/ha)	120	130	140	156	160	165	170
Exportaciones a EUA ¹	51,300	82,128	102,816	125,970	134,400	150,960	165,000

¹Se asume que todas las exportaciones son destinadas a EUA, aunque una pequeña parte se comparte con Canadá.

Fuente: Asociación Mexicana de Productores de Hortalizas en Invernaderos (AMPHI), 2006

A pesar de que México fue el último en entrar a la industria del tomate de invernadero en América del Norte, ya tiene más área de tomate en invernadero que cualquiera de los otros países, Estados Unidos o Canadá. Sin embargo, los

rendimientos medios en México son relativamente bajos, (Cuadro 3). La ventaja principal de México son las condiciones climáticas que permiten la producción en invierno y así ser un proveedor durante todo el año (Cook y Calvin, 2005).

Cuadro 3. Industria del tomate fresco en Norteamérica. Comparativo cultivados en campo e invernaderos, 2003¹.

Concepto	Unidades	E.U.A	Canadá	México	Norte América
Producción de Tomate en Invernadero	Toneladas	159,664	220,114	148,300	528,078
Área de Tomate en Invernadero	Hectáreas	330	446	950	1,726
Promedio de Rendimiento de Tomate en Invernadero	Ton /ha	484	494	156	378
Producción de Tomate en Campo	Toneladas	1,594,241	26,882	1,804,000	3,425,123
Área de Tomate en Campo	Hectáreas	50,304	1,813	63,300	115,417
Promedio de Rendimiento de Tomate en Campo	Ton/ha	32	15	28	25
Proporción de Tomates de Invernadero del Total Producido por País	Porcentaje	9	89	8	13
Estimación de las importaciones de tomate por E.U.A ^{2, 3} .	Toneladas	N.A	130,154	125,970	256,124

¹Excluye área y producción de tomate de procesamiento en los tres países.

²La cifra oficial del Departamento de Comercio de EUA para los tomates de invernadero importados de México en 2003 es diferente. La cifra reportada aquí incluye un estimado de tomates importados desde México que usaron una fracción arancelaria equivocada.

³Las importaciones de tomates de invernadero de fuera Norteamérica totalizaron 24,093 toneladas.

Fuente: Cook y Calvin (2005)

2.4 Requerimientos Climáticos del Tomate

2.4.1 Temperatura

La planta de tomate prefiere el clima cálido, las temperaturas del aire de 10 ° C o menos retardan la germinación, inhiben el desarrollo vegetativo, reducen el cuajado de los frutos, y deterioran la maduración del fruto. La planta de tomate

no tolera heladas. Las altas temperaturas del aire, por encima de 35 °C, reducen el cuajado e inhiben el desarrollo del color normal de la fruta. El rango de temperatura de aire óptimo para el crecimiento normal de la planta y el desarrollo y cuajado de los frutos esta entre 18.5 °C y 26.5 °C, con rangos de temperatura entre el día y la noche 21 °C a 29.5 °C y 18.5 °C a 21 °C, respectivamente (Keillor, 2008). Los tomates crecen mejor a temperaturas del suelo por encima de 18 °C. Las temperaturas más bajas resultarán en un crecimiento lento, retraso en el crecimiento o la pudrición de la raíz. (Bauer *et al.*, 2009).

2.4.2 Humedad Relativa

La humedad relativa óptima en un día soleado dentro del invernadero debe variar de 50 a 60% (Pérez y Castro, 2011). En el cultivo de tomate, humedades relativas del aire inferiores al 90% son deseables, pues valores superiores favorecen el desarrollo de enfermedades criptogámicas (Castilla, 1995).

Alta humedad en el ambiente (mayor al 70%) provoca mala fecundación por falta de polen debido a la nula dehiscencia de las anteras o por aplastamiento de éste, además de coadyuvar a posibles daños fisiológicos como la pudrición apical de los frutos por deficiencia de calcio. Baja humedad relativa (menor al 40%) provoca mayor pérdida de agua por transpiración, y sumada a altas temperaturas puede provocar la deshidratación de los granos de polen y por consiguiente una deficiente fecundación; esto puede causar deformación de frutos y en casos extremos nula fecundación (Pérez y Castro, 2011).

2.4.3 Luz

La respuesta de crecimiento de las plantas, se ve influenciada por la cantidad (luz acumulada o integral de la luz, intensidad luminosa por un período de luz, y el número de fotones interceptados por m^2 por unidad de tiempo) como la calidad (distribución espectral) de la luz. La cantidad de luz interceptada se ve afectada por una combinación de la duración del día, el ángulo solar, cubierta atmosférica, la densidad de plantas, y estructura del dosel. En cultivos de invernadero la intercepción luminosa es dependiente de la estructura del invernadero y los materiales de la cubierta. La distribución espectral de luz recibida en un punto dado depende del ángulo solar, el ambiente, la transmisión a través de las hojas, y la reflexión de las plantas cercanas y otros objetos, incluyendo la superficie del suelo (Heuvelink y Dorais, 2005).

El objetivo principal de un invernadero es cultivar plantas, y por lo tanto una alta transmisión de la radiación solar en la banda de onda de 400 – 700 nm es esencial para maximizar las tasas de fotosíntesis (Mpusia, 2006).

El punto de saturación fotosintética de la planta de tomate se encuentra entre 600 y 800 $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ no muy diferente a otras plantas de tipo C3 (plantas que su primer compuesto después de la fotosíntesis es de tres carbono). La tasa fotosintética es lineal para las plantas C3 de 250 a 900 MJ m^{-2} , el coeficiente de conversión de la luz es de aproximadamente 1,8 g peso seco / radiación solar total MJ. La planta de tomate puede crecer bien en luz continua entre 400 y 500

$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, un flujo de fotones entre 20 a 30 $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ es óptimo para la mayoría de los cultivos, incluido el tomate (Keillor, 2008).

2.4.4 Dióxido de Carbono CO_2

Los niveles de CO_2 del aire han subido en el último siglo, desde valores de 280 ppm a los actuales de 350-360 ppm. El umbral crítico de CO_2 , por debajo del cual el balance de carbono es negativo (respiración supera la fotosíntesis), es normalmente menor de 200 ppm (Castilla, 2012).

En un invernadero cerrado, el contenido de CO_2 en la atmósfera se reducirá durante el día debido a la actividad fotosintética (absorción de CO_2) y aumentará en la noche ya que las plantas respiran (liberación de CO_2), siendo el cambio en la concentración de 150 ppm. La actividad fotosintética de la planta puede reducir el contenido de CO_2 en el dosel de la planta entre 200 y 250 ppm. Ventilación frecuente del invernadero y la mezcla de aire dentro del dosel de la planta puede moderar este ciclo del contenido de CO_2 . La tasa de agotamiento de CO_2 está directamente correlacionada con la tasa de fotosíntesis y el agotamiento se produce rápidamente dentro de unas pocas horas después de ocultarse el sol (Keillor, 2008).

2.4.5 Movimiento del Aire

El movimiento de aire horizontal es beneficioso por varias razones. Se recomienda una velocidad aproximada del aire de 1 m /s, lo que hace que las hojas se mueva ligeramente. El movimiento horizontal de aire ayuda a

minimizar los gradientes de temperatura del aire en el invernadero, elimina la humedad de la parte inferior del invernadero, distribuye la humedad en el resto del invernadero, ayuda a que el dióxido de carbono de la parte superior del invernadero viaje entre el dosel foliar, donde se recoge y se fija en la fotosíntesis, y puede incluso ayudar a la polinización (Papadopoulos, 1991).

2.5 Cultivos Sin Suelo

Incluye a todos aquellos métodos y sistemas que hacen crecer a las plantas fuera de su ambiente natural: el suelo (Urrestarazu, 2004).

2.5.1 Clasificación de Cultivo Sin Suelo en Función del Drenaje

Los agrosistemas, atendiendo al uso que en ellos se haga del agua y las sales disueltas que transportan (Figura 2), se pueden clasificar en:

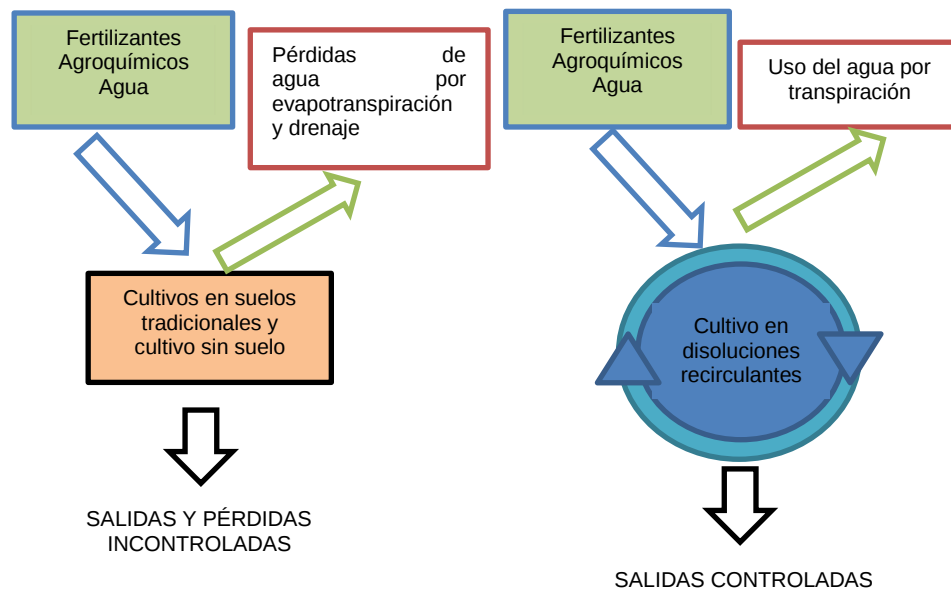


Figura 2. Entradas, salidas, y factores intrínsecos en sistemas abiertos y cerrados. Fuente: Urrestarazu, 1996.

2.5.1.1 Sistemas Abiertos (SA)

Los sistemas abiertos son aquellos en donde la disolución sobrante drena, se infiltra en el subsuelo o simplemente sufre escorrentía fuera del suelo fértil o contenedor de cultivo, sin que el cultivo vuelva a tener ningún contacto con la misma (Urrestarazu y Salas, 2004).

Las ventajas de este tipo de sistemas son: elección de un buen equilibrio entre aire, agua y elementos minerales, posibilidad de utilización de aguas de relativa mala calidad agronómica, relativa simplicidad de las instalaciones, control en el aporte utilizado (pH y CE) y el exceso de iones se drena permanentemente. Mientras que las desventajas son: necesidad de un sustrato eventualmente renovable, conocimiento de las necesidades hídricas de las plantas y dificultad para mantener constante la temperatura de las raíces (Urrestarazu y Salas, 2004).

En México, de acuerdo con Páez *et al.* (2007) las descargas de nitrógeno y fósforo contaminan de forma excesiva ríos, lagos, embalses y lagunas costeras incrementando la biomasa algal, que al morir produce periodos de disminución del oxígeno (hipoxia y anoxia) con múltiples consecuencias en los ecosistemas. También al lixiviarse en los suelos estos fertilizantes pueden contaminar mantos freáticos.

2.5.1.2 Sistemas Cerrados (SC)

Estos sistemas son aquellos en los que la disolución sobrante vuelve a incorporarse, total o parcialmente, como suministro a la fertirrigación del mismo cultivo. Estos sistemas aunque no están exentos de un gran número de inconvenientes, permiten dos grandes aportaciones a la agricultura:

1. Una máxima eficiencia en el uso de los recursos agronómicos como:
 - a) Agua
 - b) Fertilizantes, con especial interés sobre aquellos que producen problemas de eutrofización como nitratos y fosfatos.
2. El máximo control posible en las salidas del agrosistema respecto al:
 - a) Agua de fertirrigación y las sales en ella disueltas.
 - b) Pesticidas de aplicación radical (Urrestarazu y Salas, 2004).

Las ventajas de los sistemas cerrados son: buena posibilidad de aireación de las raíces en la fase inicial del cultivo y una mayor duración de las raíces en fases posteriores, eliminación del sustrato (NFT), facilidad y rapidez en los cambios de cultivo, y fácil desinfección. Mientras que las desventajas de este sistema son: desequilibrio de la disolución, exclusión de las regiones donde las aguas son de mala calidad, disponibilidad de oxigenación limitada, costo y complejidad de las instalaciones, sensibilidad a las adversidades y posibilidad de problemas fitopatológicos (Urrestarazu y Salas, 2004).

Osuna, (2011) realizó una recopilación de los trabajos de investigación en sistemas cerrados, en donde los diferentes autores reiteran las ventajas de este sistema como es el ahorro de agua y fertilizante, y discrepan en definir si este sistema afecta o no el rendimiento (Cuadro 4).

Cuadro 4. Comparación de trabajos en el ahorro de agua y fertilizantes, y su efecto en el rendimiento usando sistemas cerrados con diferentes sustratos en plantas de tomate.

Autor	Sustrato	Ahorro de Agua	Ahorro de Fertilizantes %				Efecto en el rendimiento
			N	P	K	Ca	
Parra <i>et al.</i> , 2009	Lana de roca	32	45-57	24-38	47-57	-	-7
	Toba volcánica	45					-15
	Fibra de coco	39					-19
Giuffrida <i>et al.</i> ,2003	Arcilla expandida	51-61	Ahorro Considerable				-15
Dhakal <i>et al.</i> , 2005	Suelo modificado	32	29	31	29	28	Similares
Tüzel <i>et al.</i> , 2001	Perlita	20-24	87-89	53-74	82-85	81-85	No diferencia
	Toba volcánica						
	Perlita + peatmoss						
	Toba volcánica+ peatmoss						
Alarcon <i>et al.</i> , 2001	Perlita	50	50			-	-
Giuffrida y Leonard, 2009	Perlita		81	72	79	-	No diferencia
Dasgan y Ekici, 2005	Perlita	36					-12
Pardossi <i>et al.</i> ,2009	Lana de roca	-	-	-	-	-	Poca diferencia
Nakano <i>et al.</i> , 2010	Lana de roca	-	30-37				No diferencia
Tüzel <i>et al.</i> , 2002	Perlita	10.7-34.3	-	-	-	-	No diferencia
	Toba volcánica						
	Perlita + peatmoss						
	Toba volcánica+ peatmoss						
Pellicer <i>et al.</i> , 2007	Perlita	27.50	-	-	-	-	No diferencia
Oztekin <i>et al.</i> , 2008	Perlita		31.3-90.6	86.6-62.4	88.9-61.6		No diferencia

2.6 Diferencias entre los Sistemas Recirculantes y Abiertos

Las principales diferencias entre cualquier sistema cerrado y abierto son:

2.6.1 Control

Cualquier producto que se elimine del agrosistema (nutrientes, pesticidas, exudados radicales de las plantas, etc.) podrá ser perfectamente cuantificado con independencia de lo perjudicial o no que pueda resultar para la contaminación ambiental o la problemática implicada en su reutilización. Esta propiedad, si bien es común para todos los sistemas de cultivo con recirculación de la disolución nutritiva, no es exclusiva de ellos ya que también se podría cumplir en ciertos sistemas abiertos que recogen y canalizan los drenajes con el fin de eliminarlos de las zonas de cultivo. Cualquier otro agrosistema, incluyendo los cultivos llamados biológicos, ecológicos, etc., puede producir más o menos residuos contaminantes (distintos subproductos, tóxicos o no), pero por su propia naturaleza abierta esta emisión no es cuantificada en su salida y suele ser difusa por toda la superficie, y puede terminar eutrofizando, contaminando o degradando, de una forma no controlada, el medio ambiente donde se ubica (capa freática, lagos, ríos, ecosistemas colindantes, etc.). Sólo un sistema cerrado es capaz de controlar en el espacio y en el tiempo las emisiones o salidas del sistema. (Urrestarazu y Salas, 2004).

2.6.2 Eficacia de uso o eficiencia

Definida como unidad consumida (ya sea agua o nutriente) por kg de producto agrícola obtenido. Existen algunos insumos del agrosistema que evidentemente al recircular los drenajes presentan una mayor eficiencia de uso. El manejo de

la fertirrigación, el tipo de sustrato y la calidad de las aguas de riego disponibles, entre otros factores, tiene un fuerte efecto sobre la posibilidad de aumentar la eficiencia en el uso de agua o fertilizantes. (Urrestarazu y Salas, 2004).

2.7 Recirculación

En la figura 3 se observa un esquema de los fines que se persiguen con los sistemas recirculantes y los problemas que hay que resolver para poder aplicar dicho sistema, así como de los recursos de manejo de los que se dispone.

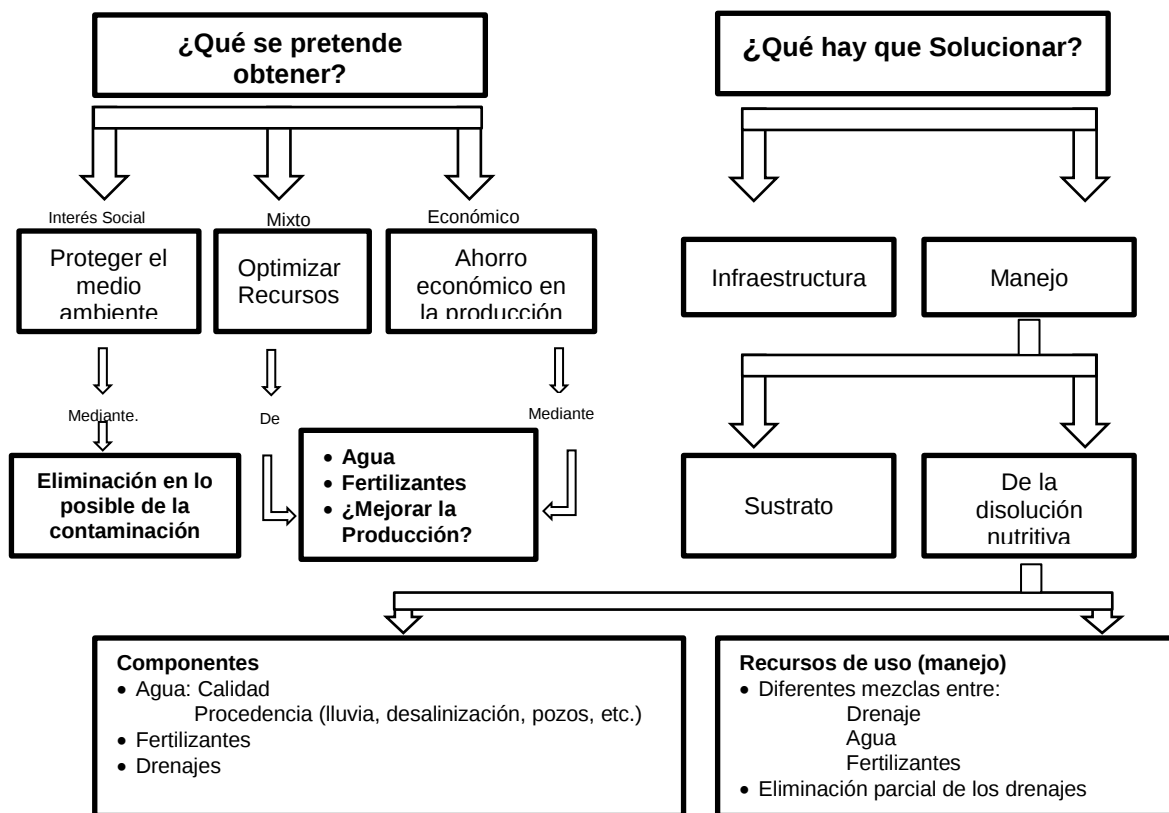


Figura 3. Esquema de las pretensiones, problemas y soluciones en forma de recursos en los sistemas cerrados. Fuente: Urrestarazu y Salas, 2004.

En este esquema se muestra que los principales inconvenientes de los sistemas cerrados son el costo de la infraestructura y el manejo de la solución nutritiva y el sustrato, de igual forma se observa que los principales propósitos que persigue son la eliminación de fuentes contaminantes y el ahorro de agua y fertilizantes, manteniendo la productividad.

En los sistemas abiertos, el agua y los nutrientes se suministran igual que en la cultura convencional del suelo, y el exceso (alrededor del 25%) de nutrientes y agua se les permite ser desperdiciado contaminando las aguas subterráneas y el suelo. Una desventaja importante de los sistemas abiertos es que, inevitablemente, una parte del agua y los nutrientes debe ser desperdiciada, lo que reduce la eficiencia del uso del agua y contamina las aguas subterráneas con sales. En los sistemas cerrados, la solución excesiva se recupera, se repone y se recicla (Meric *et al.*, 2011).

2.7.1 Factores que Afectan la Recirculación

Los factores que afectan a la recirculación son la calidad del agua de riego, el clima y el estado fenológico del cultivo.

2.7.1.1 Calidad del Agua de Riego

Las rutas de reutilización del agua se dividen en aguas de buena y mala calidad agronómica. Las aguas de buena calidad son las que tienen una conductividad eléctrica menor o igual a 0.5 dS m^{-1} y las aguas de mala calidad las que superan una conductividad eléctrica de 1.5 dS m^{-1} . El agua cuya CE esté entre

0.5 y 1.5 dS m⁻¹ puede considerarse aceptable, esta agua intermedia lógicamente tendrá un comportamiento entre los extremos (Urrestarazu y Salas, 2004).

En el caso de usar aguas de buena calidad, debe manejarse un drenaje mínimo entre 10 y 20%. En estas circunstancias la CE del drenaje es menor o similar a la CE medida cuando se usan aguas de mala calidad. Cuando se usan aguas de mala calidad agronómica el 10 y 20% medio que debía drenar en el caso anterior puede llegar a incrementarse hasta valores de un 30 y 40% en función de la calidad agronómica e incluso superar hasta un 50% cuando el agua es muy mala. A pesar de este aumento del volumen de drenaje, la CE de salida es más alta que en el caso de aguas de buena calidad (Urrestarazu y Salas, 2004).

2.7.1.2 Clima y Estado Fenológico del Cultivo

El clima es un factor crucial que ejerce un efecto muy claro en los sistemas cerrados. Una fuerte irradiación solar sobre un agrosistema usando aplicaciones de fertiriego similares provoca una salida del drenaje diferente. La transpiración afecta así mismo la cantidad de agua drenada. Hay que tener en consideración que, en general, el tiempo que los estomas permanecen abiertos es mayor en los cultivos sin suelo que en los tradicionales en suelo (Urrestarazu y Salas, 2004).

En similares circunstancias de potencial mátrico del sustrato cuando hay mayor irradiación incrementa la transpiración pero no incrementa proporcionalmente la

absorción de sales; bajo estas condiciones con igual fertiriego el drenaje presentará mayor CE. (Urrestarazu y Salas, 2004).

Otro efecto del clima en los sistemas sin suelo es el que demuestra Sonneveld y Welles (1988) trabajando con tomates en sistemas cerrados, donde la producción aumentó de 11.2 kgm^{-2} a 13 Kgm^{-2} trabajando con conductividades de 2.6 mS cm^{-1} y 3.5 mS cm^{-1} respectivamente en invernaderos con doble capa de cubierta de vidrio (18% menos intensidad de la luz) y alta humedad relativa en el día y la noche; mientras que bajo las mismas condiciones de luz y de conductividad eléctrica, pero con humedad relativa baja tanto en el día como en la noche la producción disminuyó de 13.2 kgm^{-2} a 10 Kgm^{-2} .

Otro aspecto a tener en cuenta es el estadio fenológico de la planta. Puede que una determinada CE, o altos niveles de un elemento concreto, resulten muy perjudiciales para el estadio inicial de crecimiento o durante la etapa de semillero pero, por el contrario, sea muy adecuado para la fase de maduración en tomate o melón (Urrestarazu y Salas, 2004).

2.7.1.3 Manejo del Fertirriego

El manejo de la fertirrigación ejerce un efecto importante en la utilización de las disoluciones recirculantes. Así, un mismo agrosistema tratado de diferentes formas, en un mismo clima y una misma disolución nutritiva, puede conducir a producción y/o gastos de agua diferentes (Urrestarazu y Salas, 2004).

García., *et al*, (2000) en cultivos sin suelo con sustrato en condiciones semiáridas obtuvieron un aumento del consumo de agua por las plantas, en sistemas cerrados de 83 l m^{-2} cuando se aportaba al sistema una cantidad de agua superior a un estándar definido, mientras que en sistemas abiertos el consumo fue 94 l m^{-2} mayor en donde se aportó el riego estándar.

Por otro lado, se ha demostrado que la interrelación entre la producción y el ahorro de agua forman un binomio que se puede ilustrar como los extremos de una balanza, cuya inclinación a un lado u otro en detrimento del opuesto queda condicionado por el manejo de la fertirrigación, (García y Urrestarazu, 1998). Esto se demuestra en trabajos realizados por García., *et al*, (2000) en donde con la aplicación de riego estándar se encontró un ahorro en el gasto de agua de 48% pero el rendimiento disminuyó 11%, mientras que aplicando un 20% más que el riego estándar el ahorro en el gasto fue tan solo del 20% y la disminución en el rendimiento fue de 4% usando sistemas cerrados.

2.7.1.4 Material Vegetal Utilizado

Cuando se usa un sistema cerrado no es de esperar el mismo comportamiento con una planta muy sensible, sensible o tolerante a la salinidad (Handreck y Black, 1994). Sonneveld (2004) reporta para rábano y crisantemo cultivado en arena en época de verano una reducción de 17% y 15% en el rendimiento respectivamente cuando se usa una CE de la solución nutritiva de 1.0 dS m^{-1} en lugar de la CE estándar de 1.8 dS m^{-1} , sin embargo para lirio en las mismas condiciones reporta un aumento en el rendimiento de 8%. De igual forma

reporta CE de drenaje de 0.9 dS m^{-1} para rábano, y de 1.3 dS m^{-1} para crisantemo y lirio cuando se usa CE de solución nutritiva de partida de 1.0 dS m^{-1} , mientras que cuando se usa CE estándar de 1.8 dS m^{-1} la CE de drenaje es 1.7 dS m^{-1} para rábano, 2.5 dS m^{-1} para crisantemo y de 2.6 dS m^{-1} para lirio.

En la Figura 4 se esquematiza a efectos prácticos del cultivo algunos de los procesos que se han de considerar en la recirculación de la disolución nutritiva.

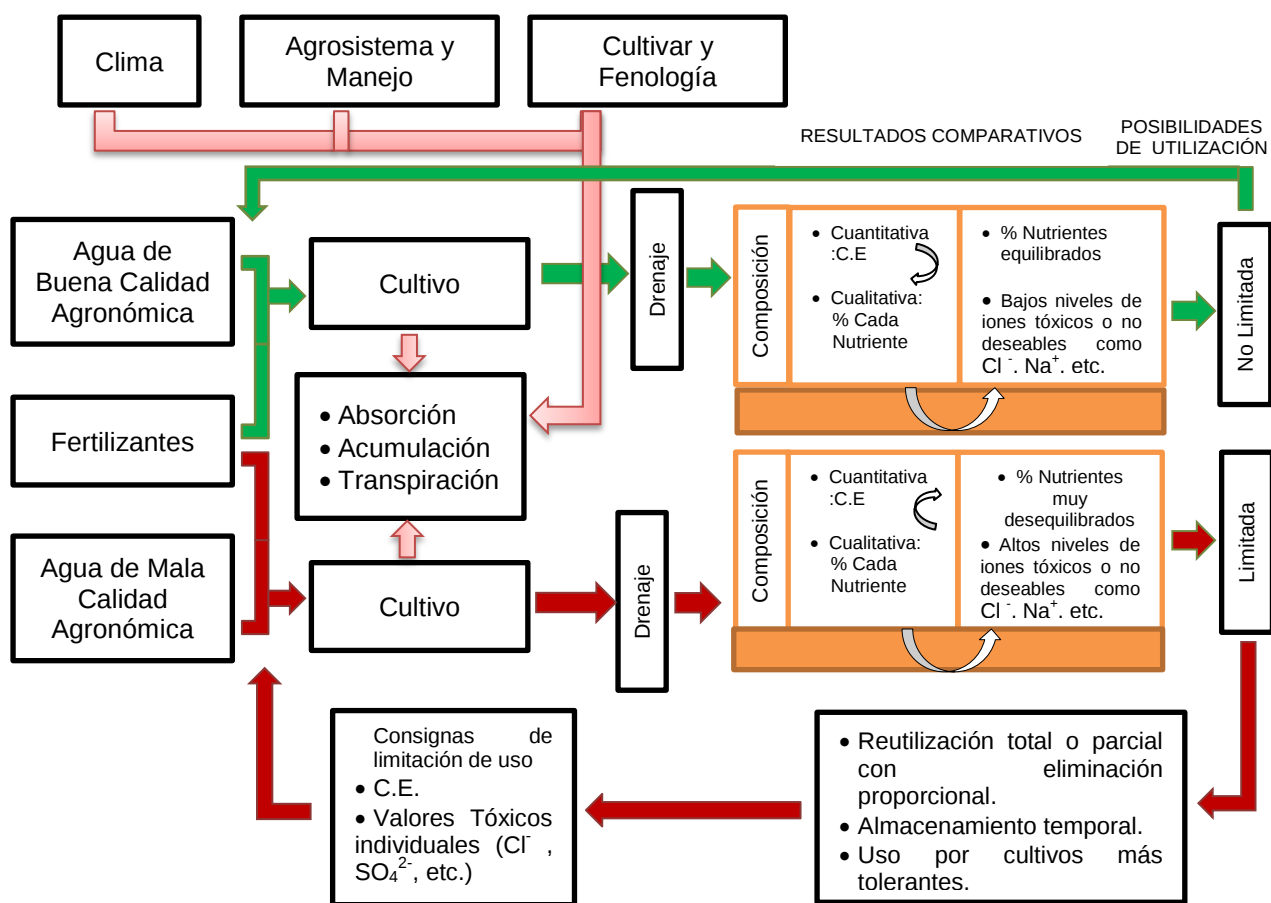


Figura 4. Esquema de la influencia de la calidad de las aguas y otros factores que afectan a los resultados y posibilidad de recirculación en la práctica de la disolución nutritiva. Fuente: Urrestarazu y Salas, 2004.

2.8 Solución Nutritiva.

La solución nutritiva se define como el conjunto de elementos nutritivos requeridos por la planta, disueltos en agua. No existe una solución teórica ideal para un cultivo en particular y la concentración óptima de los elementos nutritivos para una especie vegetal en particular depende de un conjunto de factores, entre los que destacan: la parte de la planta que se va a cosechar (raíz, tallo, hoja, flor, fruto o semilla), la estación del año, el clima, la calidad del agua y el estado de desarrollo de la planta (Sánchez y Escalante, 1988).

2.8.1 Efecto del PH.

El crecimiento y desarrollo de las plantas se ven reducidos en condiciones de acidez o alcalinidad extremas. El pH ejerce sus efectos principales sobre la asimilación de los nutrientes, la capacidad de intercambio catiónico y la actividad biológica. Bajo condiciones de cultivo intensivo, se recomienda mantener el pH del sustrato dentro de un intervalo que varía entre 5.5 y 6.8 (Salas y Urrestarazu, 2004).

En los suelos ácidos, el calcio, el fósforo, el magnesio y el molibdeno son los nutrientes más deficientes. El valor de pH óptimo para la mayoría de los cultivos es de aproximadamente 6.0. Tomates en cultivo sin suelo toleran valores de pH hasta de 5.8 (Peet, 2005).

2.8.2 Efecto de la Conductividad Eléctrica.

La Conductividad eléctrica (CE) de la disolución nutritiva es una medida de la concentración total de las sales disueltas y es a menudo referida como la salinidad; sin embargo la conductividad eléctrica no entrega información acerca de las concentraciones de los nutrientes presentes en forma individual (Adams, 2004).

Las unidades de la conductividad eléctrica (CE), son mmho/cm, dS/m, o mS/ cm (donde S es siemens). Estas unidades son equivalentes y son aproximadamente iguales a 640 mg de sal/L de agua. La alta salinidad reduce la absorción de agua y nutrientes de la planta; para tomates se establece un límite máximo de salinidad de $2,5 \text{ dS m}^{-1}$ (Peet, 2005).

En ocasiones se puede producir un descenso de la conductividad eléctrica en el drenaje promovido por períodos en los que el consumo de sales es muy elevado con respecto al consumo de agua, y normalmente, cuando el agua utilizada para preparar la disolución nutritiva es de muy buena calidad, (Salas y Urrestarazu, 2004).

En general la diferencia entre la conductividad eléctrica del drenaje y la conductividad eléctrica del riego no debería superar la unidad (Kläring y Cierpinski 1998)

Cuanto mejor es la calidad del agua de riego mayor será el incremento de la CE permitido por adición de nutrimentos, estableciéndose un límite entre 1.7 y 2.2 dS m⁻¹ de aumento por los fertilizantes cuando la conductividad del agua de riego es inferior a 0.5 dS m⁻¹, mientras que para aguas de muy mala calidad con CE por encima de 3.5 dS m⁻¹ sólo se permite un aumento de la CE debida a los nutrientes añadidos, de entre 0.5 y 0.75 décimas más en la CE final de la disolución nutritiva (Figura 5) (Salas y Urrestarazu, 2004).

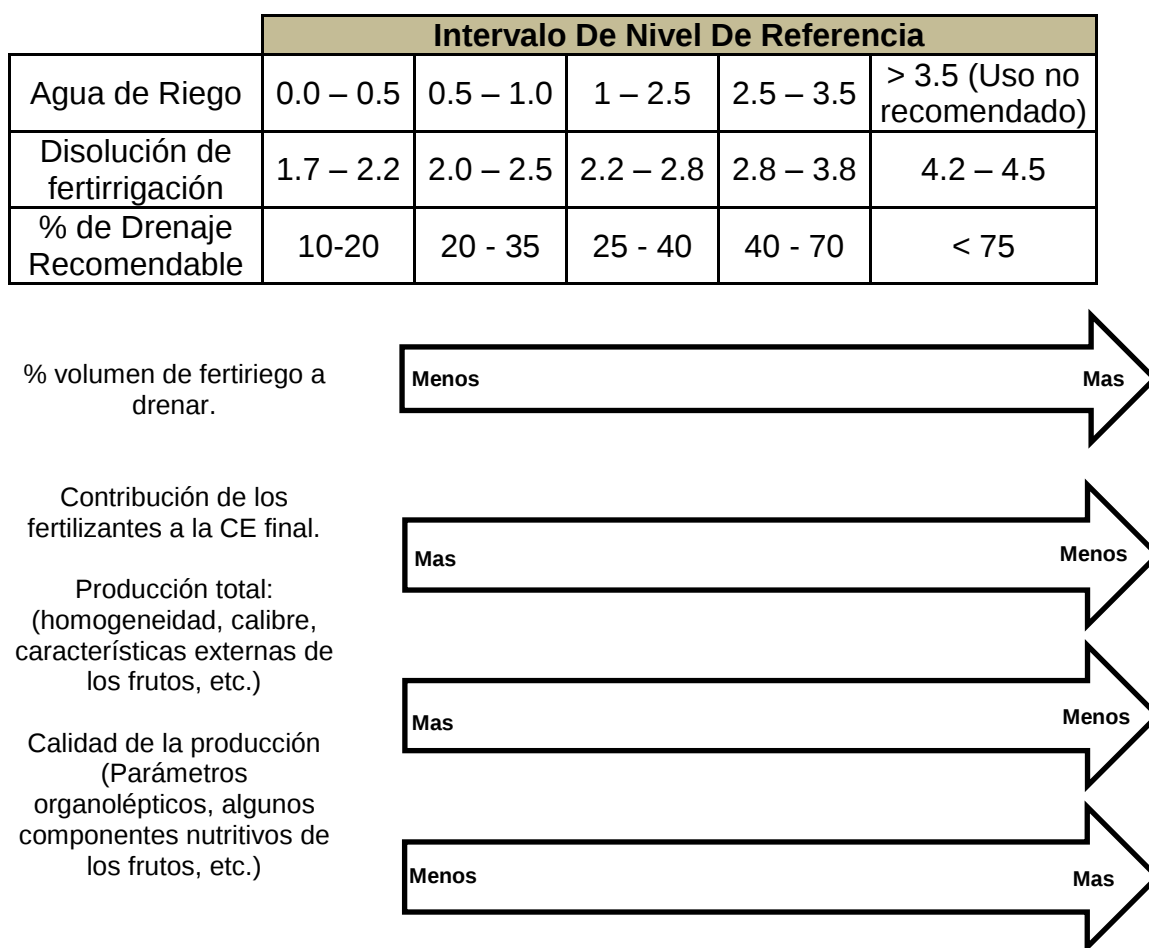


Figura 5. Niveles de referencia recomendados a aportar por los fertilizantes a la conductividad eléctrica (dS m⁻¹) de la disolución nutritiva final en función de la de la calidad de partida del agua de riego disponible, así como su relación con algunos parámetros del manejo del fertiriego y la producción esperada. Fuente: Salas y Urrestarazu. 2004.

Kläring y Cierpinski (1998) realizaron trabajos en los que se corregía la conductividad eléctrica del riego semanalmente en función de la CE del drenaje, encontrando que se logra mantener la conductividad eléctrica de la solución nutritiva en promedio en 3.0 dS m^{-1} , sin embargo el problema radica en que el control exclusivo de la CE no aporta información relativa a la composición individual de iones y puede provocar con el tiempo un desequilibrio mineral.

La conductividad eléctrica puede cambiar con el estado fisiológico de la planta y con las condiciones ambientales. En épocas de intensa radiación la solución del sustrato suele aumentar su CE con facilidad, esto se debe a que a mayor radiación hay mayor transpiración y las plantas absorben más agua que fertilizantes, ocasionando una acumulación de nutrientes en la zona de raíces, lo cual se hace necesario contrarrestarlo aumentando el número de riegos, o reduciendo al CE de la disolución. Esto facilitará la absorción radical y evitará mayores concentraciones salinas del sustrato. Por el contrario en épocas frías, el drenaje o el extracto del sustrato tienden a disminuir su CE, por lo tanto, será conveniente aumentar la concentración de la disolución de riego (Salas y Urrestarazu, 2004).

Durante el ciclo del cultivo se puede presentar tres situaciones distintas. Si se suministra una disolución nutritiva con una concentración inicial conocida; pasado un tiempo, la planta ha consumido agua y elementos nutritivos. Si la planta consume proporcionalmente más agua que sales, las sales se acumulan en el drenaje y en el medio por lo que la CE es mayor que la inicial. Por otro

lado puede suceder que la planta consuma más sales que agua, en cuyo caso la planta empobrece el medio en sales haciendo que CE sea menor que la suministrada con el fertiriego. La última situación es aquella en la cual la planta consume proporcionalmente igual cantidad de sales que de agua, en cuyo caso la CE del drenaje será igual a la del fertiriego (Salas y Urrestarazu, 2004).

En la etapa de polinización y cuaje de frutos la planta tiene un consumo de nutrientes muy elevado, por lo que generalmente, consume más sales que agua (Sheen y Hsu, 1996).

2.9 Objetivo del Riego

El objetivo del riego es mantener un suministro adecuado de agua a las raíces de las plantas sin mojar el suelo evitando que el aire no llegue a las raíces. La necesidad de agua de las plantas cambia diariamente y estacionalmente (Papadopoulos, 1991).

Al ser el agua un recurso limitante en muchas áreas agrícolas, debe ser objetivo básico de su manejo optimizar su utilización mediante riegos adecuados (que eliminen la totalidad del déficit hídrico existente en la zona radicular) y eficientes (que maximicen la fracción del agua aplicada que almacenada en el perfil del suelo enraizado y es utilizable con posterioridad por el cultivo) para obtener las máximas producciones (Castilla, 2012).

La planta de tomate requiere cantidades significativas de agua, pero no en exceso, ya que las raíces de tomate no funcionarán bajo anegamiento (condiciones anaeróbicas). Cuando el nivel de humedad que rodea las raíces es demasiado alta, se produce: epinastia, pobre crecimiento, floración tardía, un menor número de flores, y el cuajado de los frutos es más baja. Si la disponibilidad de agua es irregular aparecen trastornos de frutas tales como formación de grietas y pudrición apical (BER). Bajo estrés moderado de agua, la fotosíntesis se hace más lenta debido a que el movimiento de los gases a través de los estomas se restringe y el movimiento de agua hasta el xilema se hace más lenta (Keillor, 2008).

La cantidad de agua requerida por las plantas varía de 1 a 14 L m⁻² día⁻¹ (0,4 a 5,6 L planta⁻¹ día⁻¹), dependiendo de la etapa de crecimiento y de la temporada. La frecuencia de riego varía con el volumen del sustrato y la capacidad de retención de agua del mismo (Peet y Welles, 2005).

Los principales tipos de sistemas de riego usados en la producción de tomate son: (i) aspersión, (ii) riego por surcos (zanja), y (iii) de micro riego (goteo). Estos se clasifican con respecto a la eficiencia de la aplicación, siendo esta la relación del agua que está disponible para la planta de la total aplicada. La eficiencia del sistema de riego por aspersión es 0.6-0.8, de riego por surcos 0.4-0.6, y de riego por goteo 0.75-0.9 (Csizinszky, 2005).

La técnica de riego por goteo es de uso generalizado tanto en el campo y en invernadero, ya que es la mejor forma de suministro de agua a la planta en tasas y tiempos precisos (Keller y Bliesner, citado por Keillor (2008).

2.10 Métodos de Fertiriego

Dos preguntas son básicas en programación de riegos:

1. ¿Cuándo regar? (Frecuencia).
2. ¿Cantidad de agua a aplicar? (Dotación).

La cantidad de agua a aplicar debe reponer el agua evapotranspirada corregida en función de la eficiencia de aplicación (Castilla, 2012).

A continuación se describen algunos de los métodos más utilizados:

2.10.1 Asociados a la Planta

Los métodos de riego asociados a la planta, cuantifican el nivel de transpiración y lo reponen, pero no incluyen otras vías que impliquen gasto de agua (Salas y Urrestarazu, 2004). El empleo de sensores en el suelo y en la planta indican cuando regar, conociendo el momento en que la planta comienza a sufrir estrés hídrico (Castilla, 2012).

El potencial hídrico se mide con una cámara de presión y caracteriza el estado hídrico de la planta. Para programar riegos es necesario conocer los umbrales a partir de los cuales el cultivo sufre déficit hídrico. Su empleo en cultivos

hortícolas ha sido pobre, pues no es automatizable, entre otras razones (Castilla, 2012).

La temperatura del cultivo o de la hoja es otro indicador indirecto de su estado hídrico. La medida de la temperatura de la hoja suele efectuarse con termómetros de infrarrojos. Sin embargo este método no ha tenido mucho interés en cultivos hortícolas, especialmente en los sensibles al déficit hídrico, debido a que es un indicador tardío del estrés hídrico; la temperatura aumenta por cierre parcial de estomas lo cual ocurre mucho más tarde que la incidencia del estrés en otros procesos como la expansión foliar (Castilla, 2012).

El diámetro de los órganos vegetales presenta una evolución típica a lo largo del día con un valor máximo, que se registra al final de la noche (período en que la hidratación de los órganos es máxima). El valor mínimo se registra hacia el mediodía y coincide con la pérdida máxima de agua que experimenta la planta a través del proceso de transpiración (Salas y Urrestarazu, 2004).

Las variaciones en el contenido de agua de los tallos, que actúan como reservas de agua, son dependientes de la transpiración y absorción radicular del agua. El grosor del tallo se mide con sensores llamados “dendrómetros” o sensores LVDT (lineal variable displacement transducer) (Castilla, 2012).

El flujo de agua por el tallo es una medida directa de la tasa de transpiración de la planta y un indicador muy sensible de su estado hídrico. Su empleo en hortalizas se ha limitado a trabajos de investigación (Castilla, 2012).

2.10.2 Asociados al Clima

Según Salas y Urrestarazu, (2004) el método de riego por radiación es bastante preciso en invernaderos, ya que el resto de parámetros climáticos no sufren grandes variaciones a lo largo del día, provocando situaciones de estrés. La relación que más se usa se basa en estimar la transpiración a partir de la radiación global y el coeficiente del cultivo (K_c).

La cantidad de transpiración depende de la radiación, déficit de presión de vapor (VPD) y otras condiciones en el invernadero, tales como el movimiento del aire y la ubicación de equipos y ductos de calefacción. Dentro de un solo día, los cambios en la transpiración también siguen de cerca los cambios en la radiación. Debido a esta estrecha relación entre la radiación solar entrante y la pérdida de agua por transpiración, el riego computarizado en invernaderos comerciales se basa con frecuencia en la radiación solar recibida (medido en julios). Otros factores que afectan la transpiración son: la temperatura del aire, la etapa fenológica del cultivo, las poblaciones de plantas y el medio de cultivo (Peet, 2005). La radiación puede cuantificarse como radiación solar total y radiación fotosintéticamente activa (PAR) (Salas y Urrestarazu, 2004).

2.10.3 Asociados al sustrato

Estos métodos son los que cuantifican la cantidad de agua disponible en el sustrato, se agrupan en directos e indirectos. Los primeros miden el potencial hídrico del sustrato por medio del uso de tensiómetros, y los segundos cuantifican la reserva de agua en el sustrato (Salas y Urrestarazu, 2004).

La disponibilidad de agua disminuye enormemente al subir la tensión de 0 a 3 kPa, por lo que umbral de tensión aconsejado es de 1.5 kPa. Los tensiómetros convencionales, no son efectivos en sustratos por los rangos de medida (Castilla, 2012), y por las burbujas de aire que se presentan por la heterogeneidad de las partículas del sustrato.

El método gravimétrico consiste en colocar una balanza debajo de la bandeja de cultivo y regarla para mantener el peso constante. Se colocan dos puntos de contacto en la balanza, el riego es iniciado o parado cuando el contacto de la balanza toca el correspondiente punto de contacto; si la aguja conecta el punto de contacto más bajo, comienza el riego, si toca el punto más alto el riego se detiene (Salas y Urrestarazu, 2004).

El método de bandeja de riego por demanda funciona activando el riego cuando el nivel de solución baja de un umbral prefijado (Castilla, 2012). La duración del ciclo de riego debe ser preestablecida por la computadora de acuerdo a las condiciones de disponibilidad de agua del sustrato con tiempos fijos. La

dotación deberá ser lo suficientemente larga para permitir que se produzca el porcentaje de volumen deseado de drenaje (Salas y Urrestarazu, 2004).

2.10.4 Asociados al Sistema

El manejo de riego en cultivos sin suelo puede estar basado en la cantidad de agua drenada (porcentaje de lixiviación). Algunos excesos de riego son necesarios, sobre todo en los sistemas de riego por goteo en invernadero, para compensar la falta de uniformidad en el sistema de riego, las diferencias planta a planta y las diferencias entre localidades. Por ejemplo, filas exteriores pueden requerir más agua. Por lo general, en la producción en lana de roca en invernadero, se recomienda durante un día soleado un exceso de agua del 30 al 50%; y durante días nublados el exceso de agua debe ser del 10 al 20% (Peet, 2005).

El sistema de fitomonitorio consiste en un sistema de adquisición de datos dotado de una serie de sensores de clima (radiación solar, temperatura y humedad del aire), de planta (flujo de savia, diámetro de tallo, diámetro de fruto y temperatura de hoja) y de suelo (contenido de agua y temperatura) junto con un programa de análisis e interpretación de datos. El alto costo de estos equipos ha limitado su expansión a trabajos de investigación y a cultivos de alto valor en invernaderos muy tecnificados (Castilla, 2012).

2.11 Métodos de Desinfección del Drenaje

La recirculación de agua de drenaje en sistemas cerrados exige el empleo de agua de buena calidad y puede mejorar su eficiencia de uso, pero obliga a desinfectarla, para suprimir los patógenos (bacterias, hongos y virus) (Castilla, 2012).

Varios métodos de desinfección se han ensayado para determinar su eficacia frente a los patógenos de las plantas: tratamiento térmico, ozonización, radiación UV, filtración de membrana, filtración de arena lenta, yodación y la aplicación de peróxido de hidrógeno activado (Runia, 1995).

a. Desinfección Térmica

El calentamiento del agua de drenaje a temperaturas letales es el método más fiable para la desinfección, cada tipo de organismo tiene su propia temperatura letal. En general, una temperatura de 95°C mata la mayor parte de los organismos que son probables de causar enfermedades, siendo el tiempo de exposición mínimo de 10 segundos. Aunque esto puede parecer que requiera mucha energía, hay que señalar que la energía se recupera y se reutiliza con intercambiadores de calor. Sin embargo, la disponibilidad de una fuente de energía barata es importante para economizar (Van Os, 2010).

b. Desinfección por Radiación UV

La longitud de onda con mayor efecto germicida es la UV. Por ello se hacen pasar radiaciones UV a través de una corriente de lixiviados de

aproximadamente 19 mm de espesor. El nivel de desinfección va a depender de su turbidez, por ello previamente se debe filtrar, para aumentar la transmisión de los rayos UV (Miranda *et al.*, 2004)

Se necesitan diferentes niveles de radiación para diferentes organismos con el fin de lograr el mismo nivel de eficacia (Van Os, 2010). Runia (1994a), encontró que se requieren dosis de 150 mJ cm^{-2} – 175 mJ cm^{-2} para reducir en un 99.9% la infectividad de virus, y dosis de 100 mJ cm^{-2} para eliminar hongos patógenos.

Esta técnica tiene una serie de desventajas inherentes: a) los UV descompone el quelato de hierro y se precipita, previniendo la penetración de los rayos UV, b) el hierro soluble en la solución retarda la penetración de los rayos UV, por lo tanto, los resultados no son uniformes, c) se requiere turbulencia para ayudar a la exposición uniforme de la solución a los rayos UV, d) las lámparas UV se degradan con el tiempo, lo que resulta en variaciones en la dosis, e) los rayos UV matan indiscriminadamente patógenos y microbios beneficiosos. Ante todas las adversidades mencionadas, se debe diseñar una unidad UV compleja, la cual resulta costosa y exige altos niveles de mantenimiento (Tu y Harwood, 2005).

c. Filtración de Membrana

Cualquier material no disuelto de la solución nutritiva puede filtrarse. Varios tipos de filtros están disponibles dependiendo del tamaño de las partículas. Un filtro sintético fino (50-80 micras) elimina las sales fertilizantes disueltas o

precipitadas para evitar la obstrucción de los goteros. Estos filtros sintéticos también se utilizan como pre - tratamiento para los métodos de desinfección que incluyan el tratamiento térmico, tratamiento con ozono o radiación UV. La eliminación de patógenos requiere tamaño de poros relativamente pequeños (<10 micras; llamados micro, ultra y nano filtración) (Van Os, 2009).

d. Filtración Lenta en Arena

La filtración lenta en arena es uno de los procesos de tratamiento de agua más antiguos. La filtración lenta en arena es una técnica sencilla y de bajo costo fácilmente adaptable a cualquier tamaño de zona de cultivo. Excepto el agotamiento de oxígeno no tiene efectos secundarios negativos sobre la solución nutritiva (Wohanka, 1995).

Las ventajas de la filtración lenta en arena son: operación simple, eliminación de la turbidez, y del material orgánico, mejora del color y eliminación de patógenos tales como bacterias y virus. Las desventajas son: grandes requerimientos de área, costos de limpieza después de la obstrucción y la posibilidad de obstrucción como resultado de la alta turbidez del agua (Van Os *et al.*, 1999).

Phytophthora spp. y *Pythium spp.* pueden ser eliminadas completamente por este método, pero *Fusarium spp.*, virus y nematodos son sólo parcialmente eliminados por este método (90-99,9%) (Van Os, 2010).

e. Tratamiento con Ozono (O_3)

El ozono es un agente fuertemente oxidante muy usado en la desinfección de aguas para consumo humano (Miranda *et al.*, 2004).

Runia (1994b), concluye que para 1 m^3 de agua de drenaje 10 gr de ozono por hora son suficientes para eliminar todos los agentes patógenos, incluyendo virus.

Las desventajas del tratamiento son la incapacidad para procesar grandes cantidades de agua al mismo tiempo y que el ozono reacciona con el quelato de hierro. En consecuencia, se necesitan dosis más altas de hierro y se deben tomar medidas para hacer frente a los depósitos de hierro en el sistema (Van Os, 2010).

f. Tratamiento con Peróxido de Hidrógeno Activado

El peróxido de hidrógeno es un agente oxidante fuerte e inestable que reacciona para formar H_2O y un radical $O^\cdot$. El peróxido de hidrógeno es especialmente útil para la limpieza del sistema de riego. El método es de bajo costo, pero no es eficiente (Van Os, 2010).

Los tratamientos químicos, como el ozono y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) tienen los siguientes inconvenientes: a) pueden ser peligrosos para el medio ambiente y los trabajadores, b) pueden matar los patógenos y dañar a las plantas, c) degradan lentamente las estructuras de plástico del invernadero; d)

los productos químicos son costosos en el largo plazo, e) la manipulación segura, la entrega y el almacenamiento de estos productos químicos pueden ser difícil y costoso (Tu y Harwood, 2005).

g. Yodación

El yodo es un halógeno, como el cloro, que ejerce un efecto biocida a través de su propiedad química como oxidante fuerte. Resinas de yodo ofrecen ventajas adicionales para uso en el campo, porque las resinas son una forma extremadamente estable de yodo que se puede incorporar en una amplia gama de filtros. Estas resinas actúan como un desinfectante de la disolución en agua limitada (Backer y Hollowell, 2000).

El método consiste en hacer pasar los drenajes de la plantación filtrados a través de una resina de intercambio que dosifica yodo (Miranda *et al.*, 2004).

h. Cloración

El ácido hipocloroso puede ser usado por su poder oxidante. En la mayoría de los casos se ha usado una dosis de 4 a 5 g L⁻¹ de cloro libre durante un tiempo de exposición de 2 horas. Su mayor problema es la inestabilidad química de los compuestos clorados (Miranda *et al.*, 2004).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el logro de los objetivos propuestos y la comprobación de las hipótesis planteadas en el trabajo de investigación, se llevaron a cabo tres experimentos:

Experimento 1. Evaluación de la Conductividad eléctrica de la solución nutritiva, frecuencia y Dotación de Riego sobre rendimiento y calidad de frutos.

Experimento 2. Evaluación del método de riego a tiempos y método de riego por radiación PAR con diferentes porcentajes de drenaje.

Experimento 3. Evaluación del efecto de la recirculación de la solución nutritiva lixiviada.

El análisis estadístico realizado para todos los experimentos fue un análisis de varianza de dos factores, el cual fue realizado con la herramienta de análisis del programa Excel. De igual forma se hizo comparación de pares de medias de tratamiento por el método de la prueba de Tuckey y se determinó el efecto principal de cada factor o su interacción sobre las variables de respuesta.

3.1 Experimento 1.

3.1.1 Localización del Experimento

La investigación se desarrolló en el invernadero uno del campo experimental Tlapeaxco de la Universidad Autónoma Chapingo en el Estado de México, situada geográficamente a 19° 29' LN y 98° 53' LO, y a una altitud de 2250 m.

En la zona se registra una temperatura media anual de 15 °C y una precipitación pluvial anual de 695 mm. La temperatura media en el mes más caliente es de 18 °C y en el más frío de 11 °C. El periodo de lluvias es de mayo a octubre, con un máximo promedio en julio, de 130 mm (Flores *et al* 2007).

3.1.2 Características del invernadero

El invernadero consta de una superficie de 1080 m² (27 m de ancho x 40 m de largo). La orientación (azimut) del invernadero es de 48° E con respecto al eje Norte-Sur. La altitud de las paredes laterales del invernadero es 2.1 m. El invernadero tiene una sola cubierta de plástico calibre 700 ultravioleta y ventanas laterales (170m²) con mallas anti-insectos.

El área total del invernadero está dividida en tres naves con una ventana cenital cada una y el área total de ventilación cenital tiene 60 m² (Figura 6). La temperatura y humedad relativa del aire se regulan mediante ventilación natural (cierre y apertura de ventanas) y un sistema de calefacción directa. El sistema calefacción no operó durante el experimento.



Figura 6. Vista Exterior del Invernadero

3.1.3 Material Genético

Se usó semilla de híbrido de tomate tipo Charlestone, este tipo de tomate es redondo indeterminado grande y firme. Planta de vigor medio alto con entrenudos cortos y buena cobertura foliar, rústica y compacta. Los frutos son semi-globosos de tamaño grande y muy uniformes; presentando 7 racimos por planta, con 4 – 6 frutos por racimo con peso promedio de 220 a 250 gramos. Presenta alta tolerancia al manchado de frutos (*Blotchy ripening*), *Fusarium* 1 y 2, Nemátodos, virus del mosaico del tabaco (TMV), *Fusarium Crown rot* (Fcr), y *Verticillium* (www.Linkagro.com).

3.1.4 Manejo Agronómico

Para la germinación de las semillas de tomate se usaron charolas de unicel de 200 cavidades, usando como sustrato turba vegetal preparada para semillero (Figura 7a). El trasplante se realizó a los 34 días después del trasplante (DDS), colocándose una planta por maceta; ésta consiste en una bolsa de

plástico con capacidad de 12 litros llenada con tezontle rojo como sustrato (Figura 7b).



Figura 7. Semillero (a) y vista panorámica del experimento 1 (b)

Las plantas fueron mantenidas a un solo tallo con densidad de siembra de 6.0 plantas por m^2 . Cada tratamiento y su respectiva repetición consistieron de 30 plantas cada uno, las cuales se encontraban sobre una estructura metálica con canaletas con una pendiente de 4.15% que permitía la recolección del drenaje, para evaluar la conductividad eléctrica y determinar la necesidad de aumentar las dosis de riego para el lavado de sales acumuladas en el sustrato (Figura 8).

Para mantener erectas las plantas, se manejó un sistema de tutoreo en el cual se sujetó cada planta a un hilo de rafia amarrada a un alambre sostenido de la estructura superior del invernadero. Semanalmente se quitaban los brotes axilares y se eliminaban las hojas inferiores conforme avanzaba la altura de cosecha, dejando dos racimos por debajo de la última hoja.



Figura 8. Estructuras metálicas con canaletas para recolección de drenaje

3.1.5 Diseño Experimental

Se utilizó un diseño completamente al azar (DCA) con dos factores (frecuencia de riego y conductividad eléctrica de la solución nutritiva), con 4 tratamientos cada uno con su respectiva repetición, se incluyó un quinto tratamiento testigo el cual se manejó de la forma tradicional, sin recolección de lixiviados y con una sola frecuencia de riego y conductividad eléctrica desde el trasplante hasta el final del ciclo (Cuadro 5). Cada unidad experimental estaba comprendida de 30 plantas.

Las láminas de riego durante todo el ciclo de cultivo fueron ajustadas de acuerdo al drenaje, el cual se estableció en un 30% para todos los tratamientos, el tiempo entre riego y riego fue determinado por las características del sustrato,

realizando riegos cada vez que el sustrato perdía 5% del volumen total de agua disponible en el volumen del contenedor (Apéndice A).

Cuadro 5. Distribución de tratamientos experimento 1

Tratamiento	De 0 a 60 DDT			De 60 DDT hasta Fin de Cosecha	
T1	CE: 1.60 ms/cm 15R-1min C/30min	12R-1min C/40min	12R-3min C/40 min	CE: 2.05 ms/cm 12R-2min C/40 min	10R-2min C/45 min
T2	CE: 2.05 ms/cm 15R-1min C/30min	12R-1min C/40min	12R-3min C/40 min	CE: 3.10 ms/cm 12R-2min C/40 min	10R-2min C/45 min
T3	CE: 1.60 ms/cm 6R-2.5min C/60min	6R-2min C/60min	9R-4min C/60min	CE: 2.05 ms/cm 8R-3min C/60min	7R-3min C/60min
T4	CE: 2.05 ms/cm 6R-2.5min C/60min	6R-2min C/60min	9R-4min C/60min	CE: 3.10 ms/cm 8R-3min C/60min	7R-3min C/60min
T5	CE: 2.05 ms/cm 7R-5 min C/60min			CE: 2.05 ms/cm 7R-5 min C/60min	

DDT: días después del trasplante; C.E: conductividad eléctrica; R: riegos; min: minutos; C:Cada

3.1.6 Manejo de Solución Nutritiva y Riego

La solución nutritiva se preparó de acuerdo a los requerimientos del cultivo reportados por Urrestarazu (2004) y Nuez (1995) para los primeros 60 días después del trasplante y de los 60 días después del trasplante hasta finalizar el ciclo (Cuadro 6 y 7). La solución nutritiva de micro nutrimentos utilizada durante todo el ciclo de cultivo fue la siguiente: Fe $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Mn $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Cu $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Zn $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ y B $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

Cuadro 6. Composición de la solución nutritiva

Solución Nutritiva	Cationes (meq /L)					Aniones (meq /L)			C.E
	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	H ⁺	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ⁻	
De 0-60 DDT tratamientos 1 y 3	5	6	3	0.5	1.5	10	1	5	1.6
De 0-60 DDT tratamientos 2 y 4 y de 60DDT hasta fin de ciclo tratamientos 1 y 3	6	8	4	1	1.5	12	1.5	7	2.05
De 60DDT hasta fin de ciclo tratamientos 2 y 4	9	12	6	2	2.0	17	3.0	11	3.1

Cuadro 7. Fuentes fertilizantes para preparar y ajustar la solución nutritiva

Fertilizante	Formula Química	gr fertilizante/1000 L agua		
		1.6	2.05	3.1
Nitrato de Calcio hidratado	Ca(NO ₃) ₂ 4 H ₂ O	708	944	1416
Fosfato Mono potásico	NH ₄ H ₂ PO ₄	58	115	230
Nitrato de Potasio	KNO ₃	404	404	505
Sulfato de Potasio	K ₂ SO ₄	87	174	348
Sulfato de Magnesio Héptahidratado	Mg SO ₄ 7H ₂ O	370	492	709
Ácido Fosfórico al 85%	H ₃ PO ₄	16	16	16
Ácido Sulfúrico al 98%	H ₂ SO ₄	49	49	49
Sulfato Ferroso hidratado	FeSO ₄ 6H ₂ O	13	13	13
Sulfato de Manganeso hidratado	MnSO ₄ 4H ₂ O	2.0	2.0	2.0
Sulfato de cobre hidratado	CuSO ₄ 5H ₂ O	0.4	0.4	0.4
Sulfato de zinc hidratado	ZnSO ₄ 7H ₂ O	0.5	0.5	0.5
Ácido bórico	H ₃ BO ₃	0.6	0.6	0.6

La solución nutritiva se preparó en tanques de 1000 litros y se transportó a dos tambos de 200 litros al interior del invernadero con una bomba de ½ HP a

través de una tubería de 1 ½ pulgadas (Figura 9a, 9b y 9c). Desde los tambos de 200 litros se aplicaba el riego con bombas de ½ HP usando manguera de 16 mm de diámetro comercial y goteros auto compensados de 3.9 LPH de la empresa Rex irrigación. El riego se aplicó diariamente a cada tratamiento de tal manera que el drenaje estuviera alrededor del 30%. En el tratamiento testigo se usaron goteros auto compensados de 2.2 LPH de la empresa Rex Irrigación. El riego fue automatizado usando un microcontrolador de la marca Atmel 80c51 al que se programó en lenguaje C (Apéndice B), y por medio del cual se activaba un sistema de relevadores que controlaba las válvulas solenoides y las bombas (Figura 9d).

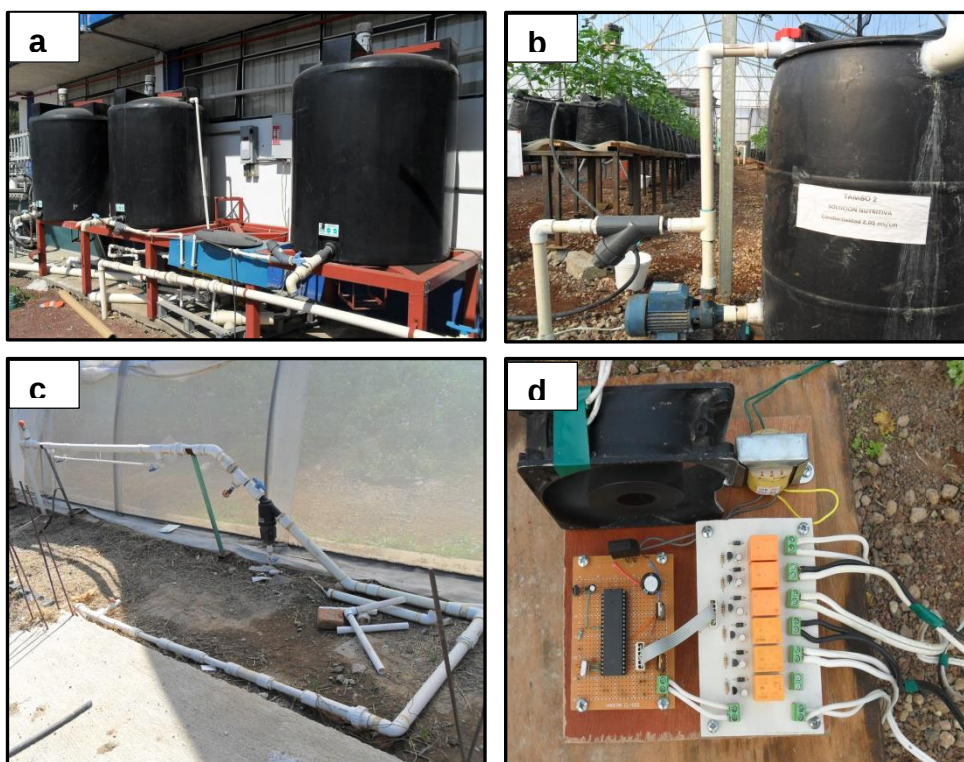


Figura 9. Tanques de 1000 litros para preparación de solución (a), Tambo de 200 litros desde donde se distribuía el riego (b), Tubería que transportaba la solución de tanques de 1000 litros a tambos de 200 litros (c), Microcontrolador y placa de relevadores para control de riego (d)

El diagrama de tiempos de encendido y apagado de las válvulas y bombas se muestra en el (Apéndice C). Para la aplicación del riego se usaron 2 bombas de $\frac{1}{2}$ HP y 4 electroválvulas distribuidas con las cuales se abastecía las 8 líneas de cultivo (Figura 10).

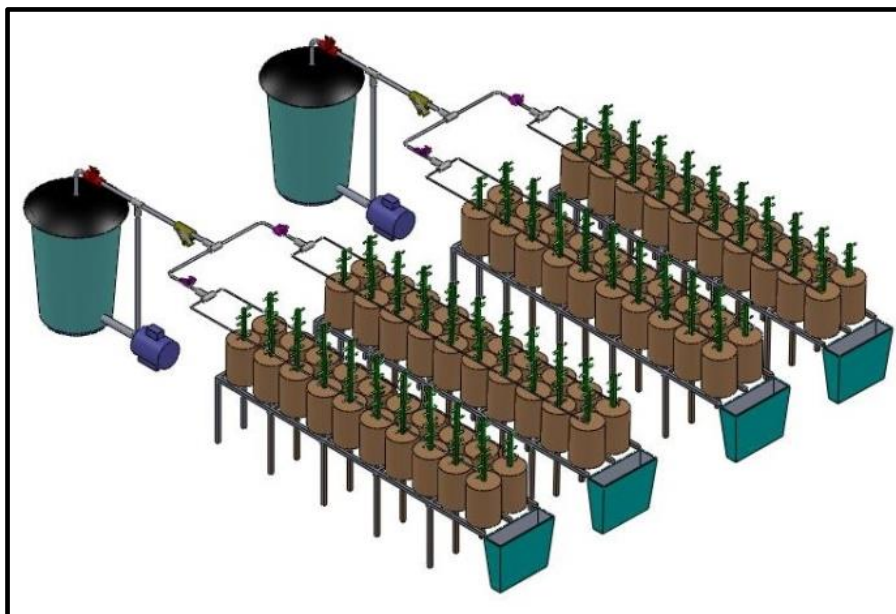


Figura 10. Vista frontal de la distribución de los tratamientos

Durante el desarrollo del cultivo, se presentó mosquita blanca (*Bemissia sp*), la cual se controló con Beleaf® a razón de 1.0 g L^{-1} , realizando aplicaciones mensuales durante el ciclo del cultivo, igualmente se presentó cáncer bacteriano (*Clavibacter michiganensis subsp*), la cual se controló con seis aplicaciones intercaladas de Agry-gent plus 800^{MR} a razón de 6 g L^{-1} y de Terramicina® agrícola 5% a razón de 1 g L^{-1} cada 15 días durante el ciclo del cultivo.

3.1.7 Evaluación de Parámetros Climáticos

Durante todo el experimento se monitoreó con un termo higrómetro digital marca TFA la temperatura y la humedad relativa máxima y mínima dentro del invernadero (Figura 11).



Figura 11. Termo higrómetro digital

3.1.8 Evaluación de la solución nutritiva lixiviada

Se midió el volumen drenado de cada tratamiento con una probeta de 1000 mL (Figura 12a), la conductividad eléctrica y el pH del drenaje con un medidor de bolsillo combinado de la marca HANNA modelo HI98130 (Figura 12b), el medidor fue calibrado cada semana con las soluciones buffer recomendadas por HANNA para pH (HI17004 Y HI7007) y para C.E (HI7030). Tanto las mediciones de volumen como de pH y C.E se realizaron 3 veces al día (8 am, 12 pm y 3 pm) todos los días del experimento.

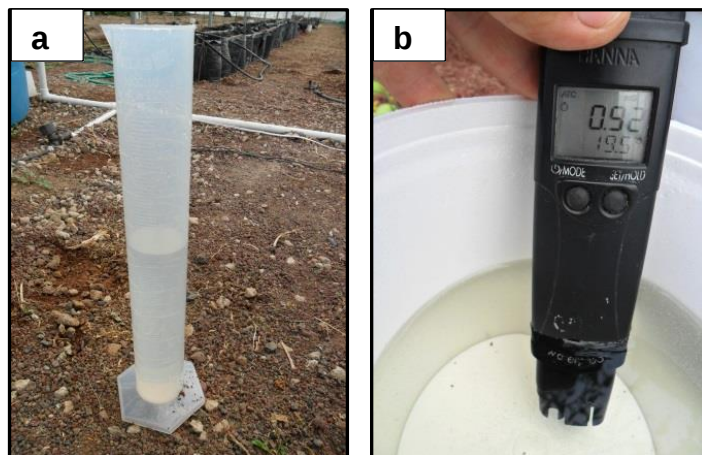


Figura 12. Probeta de 1000 mL para medir volumen drenado (a), Medidor combinado de conductividad eléctrica y pH (b).

3.1.9 Crecimiento de las Plantas

El grosor del tallo se obtuvo al promediar la medición tomada 10 cm arriba del sustrato, a la mitad de la planta y 10 cm del ápice hacia abajo. Las mediciones se realizaron con un Vernier mecánico de 0- 150 mm de rango. La altura de la planta se determinó con una cinta métrica metálica, midiendo de la base del tallo hasta el ápice de crecimiento del tallo principal. Igualmente se determinó el número de ramas y el número de hojas.

Las mediciones de crecimiento se hicieron a 4 plantas escogidas alternativamente por tratamiento. Las mediciones iniciaron 4 semanas después del trasplante y se realizaron cada semana hasta la décima semana y cada dos semanas de la semana 10 hasta la semana 14.

3.1.10 Peso de Frutos, Sólidos Solubles y Rendimiento

La recolección de los frutos se inició 15 semanas después del trasplante, y se recolectaron frutos cada semana hasta la semana 22. Los frutos maduros recolectados fueron pesados por tratamiento con una balanza de marca Ohaus Scout Pro modelo SP601 con 0.1 g de precisión (Figura 13a). Al 30% de los frutos recolectados cada semana se les midió la cantidad de sólidos solubles totales con la ayuda de un refractómetro de marca HANNA modelo HI96801, lo cual consistió en agregar directamente dos gotas de jugo sobre el sensor del refractómetro (Figura 13b), después de cada medición se hizo una calibración con agua destilada. El rendimiento fue calculado y escalado en Ton/ha.

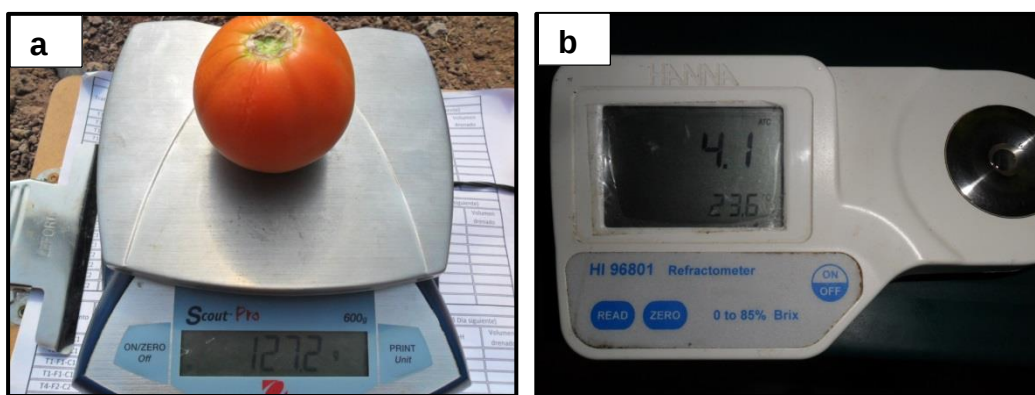


Figura 13. Balanza para peso de los frutos (a), Refractómetro para determinar sólidos solubles (b).

3.2 Experimento 2.

La investigación se desarrolló en el campo experimental Tlapeaxco de la Universidad Autónoma Chapingo, en el invernadero experimental número 4, el cual consta de una superficie de 81 m² (9 m de anchura x 9 m de longitud). La altitud de las paredes laterales del invernadero es de 2.0 m. El invernadero

tiene una sola cubierta de plástico calibre 700 ultravioleta y ventanas laterales (36 m²) con mallas anti-insectos. El área total de ventilación cenital tiene 9 m². La temperatura y humedad relativa del aire se regulan mediante ventilación natural (cierre y apertura de ventanas) y además está provisto de un sistema de nebulización, el cual se utilizó en los primeros 60 días después del trasplante (Figura 14).



Figura 14. Vista interior del invernadero experimento 2

Tanto el material genético como el manejo agronómico fue igual que para el experimento 1, sin embargo en este experimento cada tratamiento se compuso de 13 plantas (Figura 15).



Figura 15. Vista general del experimento 2

3.2.1 Diseño Experimental

Se utilizó un diseño completamente al azar con dos factores (método de riego y porcentaje de drenaje), con 6 tratamientos (Figura 16). Para el método de riego a tiempos se utilizaron las conductividades eléctricas, y las frecuencias de riego obtenidas del experimento 1 (12 riegos de 1 minuto cada 40 minutos y 2.05 mS/cm para los primeros 60 días después del trasplante) y (12 riegos de 2 minutos cada 40 minutos y 3.1 mS/cm de los 60 días después del trasplante hasta el final del ciclo del cultivo). En cuanto al riego por radiación, la frecuencia de riego fue determinada por la acumulación de la radiación fotosintéticamente activa PAR, estableciendo un umbral de 2.5 mol m^{-2} , este umbral se determinó como se muestra en el Apéndice D (Cuadro 8).

Cuadro 8. Distribución de tratamientos experimento 2

Tratamiento	De 0 a 60 DDT	De 60 DDT hasta Fin de Cosecha	Drenaje
T1	CE: 2.05 ms/cm 12R-1min	CE: 3.10 ms/cm 12R-2min	10%
T2	CE: 2.05 ms/cm 12R-1min	R-2min cuando se acumulan 2.5 mol m ² de PAR	10%
T3	CE: 2.05 ms/cm 12R-1min	CE: 3.10 ms/cm 12R-2min	20%
T4	CE: 2.05 ms/cm 12R-1min	R-3min cuando se acumulan 2.5 mol m ² de PAR	20%
T5	CE: 2.05 ms/cm 12R-1min	CE: 3.10 ms/cm 12R-2min	30%
T6	CE: 2.05 ms/cm 12R-1min	R-3min cuando se acumulan 2.5 mol m ² de PAR	30%

DDT: días después del trasplante; C.E: conductividad electrica; R: riegos; min: minutos
PAR: Radiación fotosintéticamente activa

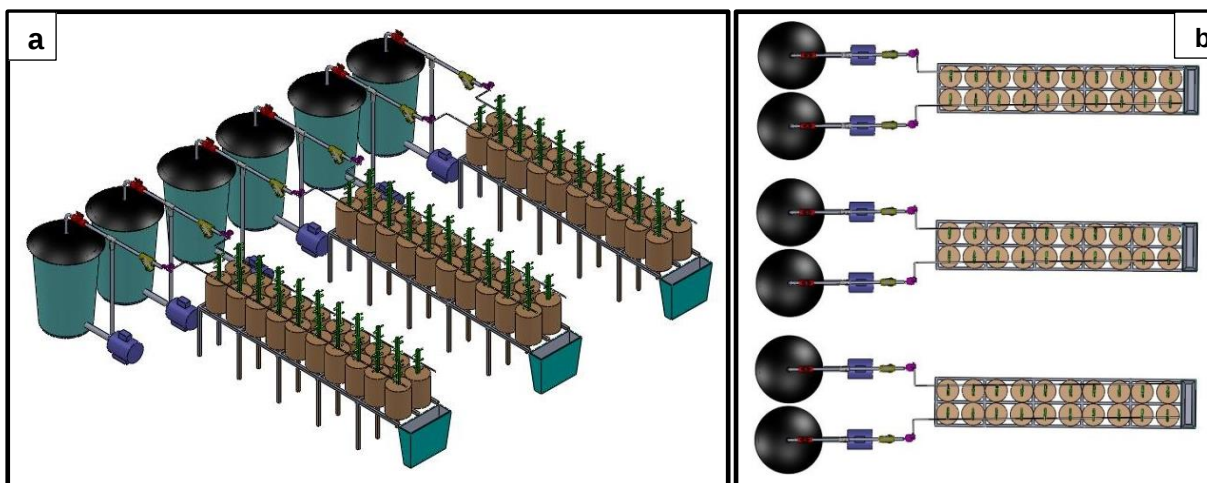


Figura 16. Vista frontal de la distribución de los tratamientos (a), Vista superior de distribución de los tratamientos experimento 2 (b).

3.2.2 Manejo de Solución Nutritiva y Riego

La solución nutritiva se preparó en un tanque de 1000 litros y se llevó al invernadero por medio de un manguera de $\frac{3}{4}$ de pulgada con una bomba de $\frac{3}{4}$ HP a seis tambos de 120 litros dentro del invernadero. Desde estos tambos se aplicaba con bombas de $\frac{1}{2}$ HP usando manguera de 16 mm de diámetro comercial y goteros auto compensados de 3.9 LPH de la empresa Rex Irrigación.

Los riegos para el método de riego a tiempos fueron programados con temporizadores digitales de la marca IPSA, modelo TE-102 con capacidad para programar 20 eventos. Cada línea tenía un recipiente para captar el drenaje, el cual estaba provisto de un switch con un flotador de unicel que detenía el riego cada vez que llegaba al volumen drenado deseado (Figura 17a y 17b). El

flotador estaba puesto para que se detuviera el riego al 10, 20 y 30% del volumen drenado de cinco riegos, y no de los 12 riegos diarios, esta práctica se realizó para minimizar el estrés de las plantas por déficit de agua; de igual forma tanto el primer riego como el último del día se realizaron obligatoriamente. Una vez transcurridos los cinco riegos se vació el drenaje del recipiente para que se volviera a iniciarse el conteo. Para realizar los riegos por radiación se implementó un programa de adquisición de datos, control de dispositivos y almacenamiento de datos en el Software LabView de National Instruments (Apéndice E).

El programa de adquisición consistió en realizar la lectura del sensor de radiación PAR de marca Apogee modelo SQ-225 (Figura 17c), por medio de la tarjeta de adquisición de datos NI-6008.

La señal de salida del sensor adquirida variaba entre 0 - 4 Voltios para rangos de radiación PAR de 0 a $2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, la señal adquirida se multiplicó por el factor de conversión de $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para determinar la radiación PAR instantánea, las lecturas se hicieron cada 30 minutos, y se determinó la integral de la radiación en ese tiempo, finalmente para la realización de los riegos se fue acumulando la integral de radiación de cada 30 minutos y se hizo generar una señal digital cada vez que esta integral llegó a un umbral de 2.5 mol m^{-2} . La señal digital generada activaba la placa de relevadores que encendía las bombas y las válvulas (Apéndice F). En la figura 18 se muestra el diagrama de

tiempos para un día soleado, nublado y promedio para el método de riego por radiación PAR.

Tanto las lecturas de la radiación instantánea como la integral de radiación fueron graficados en el panel frontal del LabView (Figura 17d), de igual forma los datos de la integral de radiación de todo el día fueron almacenados en un archivo de Excel, para su posterior análisis.

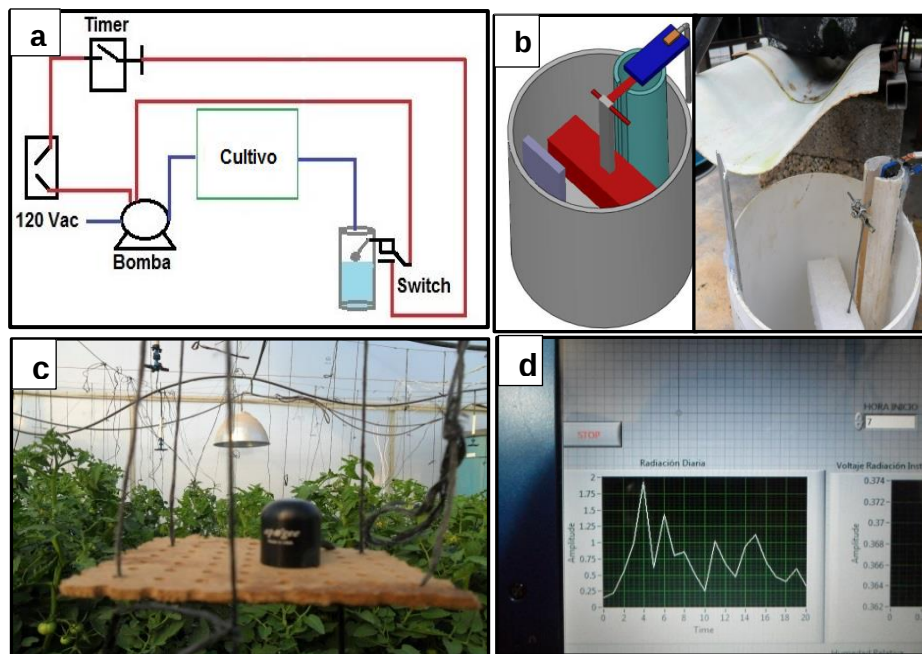


Figura 17. Diagrama electrónico sistema que detiene el riego por volumen drenado (a), recipiente con switch para detención de riegos (b), Sensor de radiación PAR (c), gráfica de integral radiación PAR en LabView (d).

Para la medición de la temperatura se usó un sensor LM35 con rango de medida de 0 a 100 °C y con precisión de ± 1 °C y para la medición de la humedad relativa el sensor HMZ-433A1 con rango de medida de 20 – 90% y

con precisión de $\pm 5\%$. Las lecturas de cada uno de estos sensores fueron adquiridas y almacenadas cada media hora por medio del programa del LabView (Apéndice G).Igual que en el experimento uno se realizó la medición del volumen drenado de cada tratamiento, la conductividad eléctrica y el pH.

3.2.3 Crecimiento de las Plantas

Del mismo modo que en el experimento uno se determinó el grosor del tallo, la altura de la planta, y el número de ramas. Adicionalmente, se midió el número de racimos, número de frutos por racimo y número de racimos con flores. Estas mediciones se hicieron a 5 plantas por tratamiento, a los 60, 70 y 80 días después del trasplante. A los 80 días después del trasplante se realizó el despunte, teniendo ya las plantas 5 racimos. También se determinó el índice de área foliar con el analizador de área foliar de marca Licor, modelo LAI-2000; dichas mediciones se realizaron a los 60 y a los 80 días después del trasplante.

3.2.4 Peso de Frutos, Sólidos Solubles y Rendimiento

La recolección de los frutos se inició 13 semanas después del trasplante, y se recolectaron frutos cada semana hasta la semana 21. Los frutos se pesaron y se determinó la cantidad de sólidos solubles totales, de igual forma que en el experimento 1; adicionalmente se determinó el diámetro horizontal y vertical de los frutos, con un Vernier mecánico de 0- 150 mm de rango (Figura 19a y 19b).

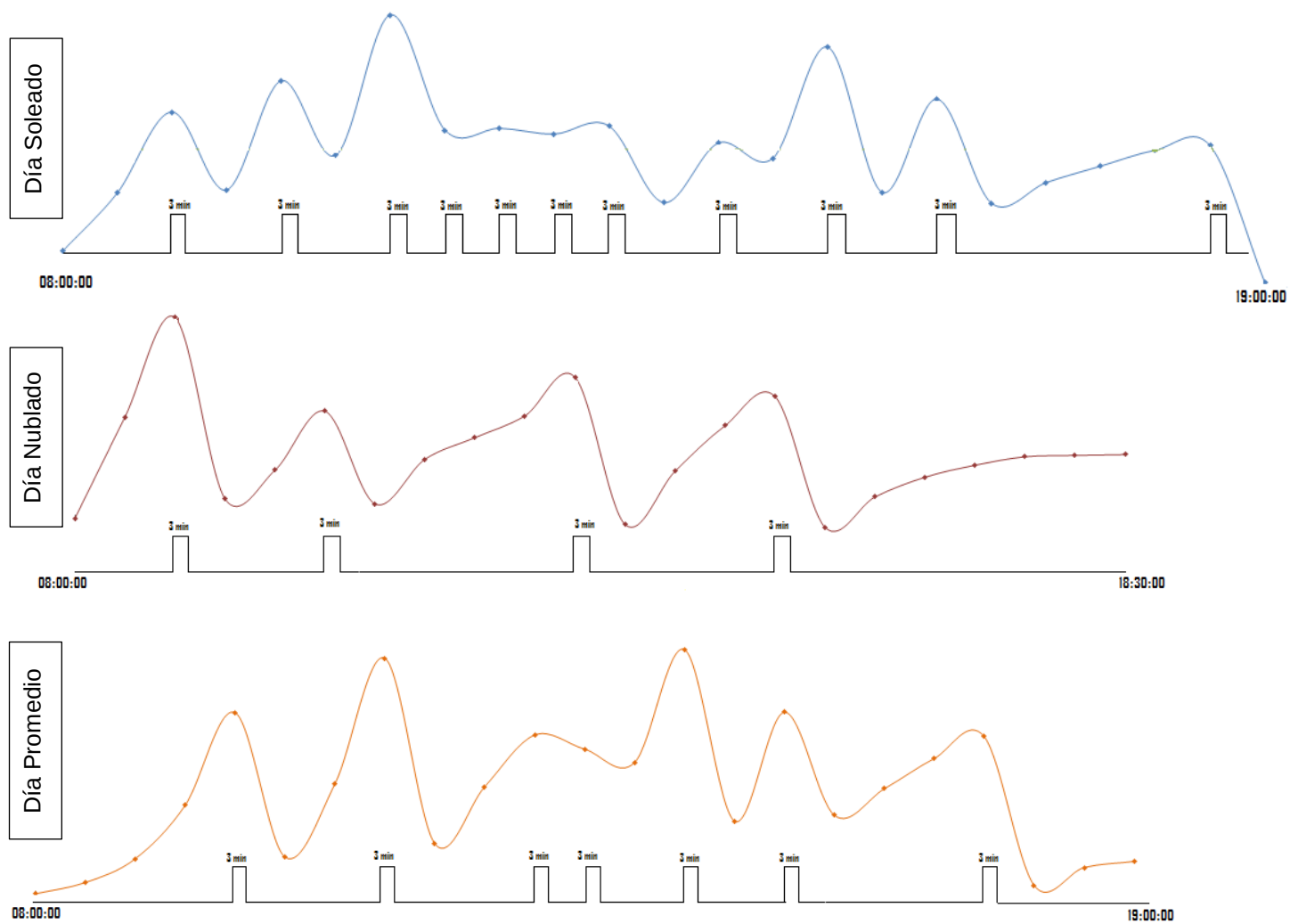


Figura 18. Diagrama tiempos para riego por radiación PAR para un día soleado, nublado y promedio

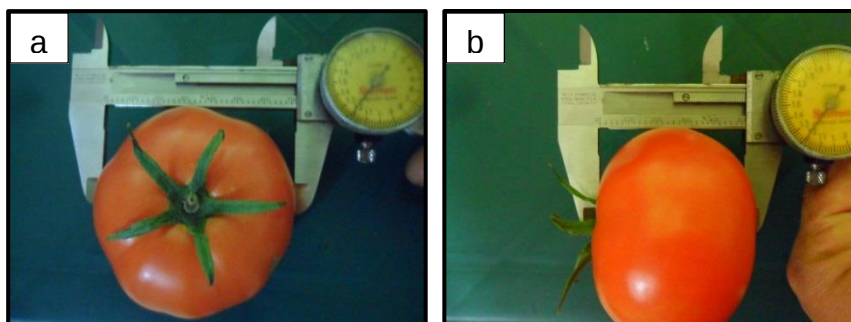


Figura 19. Medición de diámetro horizontal (a), Medición de diámetro vertical (b)

3.3 Experimento 3.

Este experimento se realizó en el mismo invernadero y en sincronía con el experimento 2, usando el mismo material genético, igual manejo agronómico y la misma solución nutritiva.

Se manejaron 2 tratamientos cada uno compuesto por 26 plantas, las frecuencias de riego y la conductividad eléctrica con que se trabajó fueron (12 riegos de 1 minuto cada 40 minutos y 2.05 mS/cm para los primeros 60 días después del trasplante) y (12 riegos de 2 minutos cada 40 minutos y 3.1 mS/cm de los 60 días después del trasplante hasta el final del ciclo del cultivo). En estos dos tratamientos el drenaje no fue controlado. Los tratamientos fueron un sistema cerrado (recirculación de lixiviados) y un sistema abierto (sin recirculación de lixiviados). En el sistema cerrado el drenaje fue recolectado y esterilizado con una lámpara ultravioleta y recirculado (Figura 20). Los riegos con la solución lixiviada esterilizada se realizaron solamente en las horas de la mañana (8:45 am -11:45 am, 5 riegos) en días soleados, esto con el fin de que

no se presentaron problemas de agrietamiento de frutos por descompensación salina. En el sistema abierto las plantas se encontraban sobre el suelo, por lo cual el drenaje no fue recolectado.



Figura 20. Sistema cerrado (recirculación de la solución nutritiva)

En el sistema cerrado el drenaje fue recolectado en un recipiente con capacidad de 30L, de ahí el drenaje era llevado a través de una tubería de $\frac{1}{2}$ pulgada y una bomba de $\frac{1}{2}$ hp a un tambo de 120L que se encontraba a 1.50 m de altura, donde se almacenaba el drenaje para su posterior esterilización (Figura 21a). Posteriormente el drenaje se hacía pasar por una lámpara de luz ultravioleta marca Polaris Scientific Ultraviolet modelo UV-1C para desinfectarlo, luego de pasar por la lámpara el drenaje se depositaba en un tambo de 120L, de donde se tomaba para recircularlo (Figura 21b).



Figura 21. Sistema de recolección de drenaje (a), Sistema de desinfección de drenaje (b)

Cabe mencionar que en el sistema cerrado no se realizó el ajuste de los nutrimentos de la solución lixiviada para ser recirculada, solamente se realizó el tratamiento de esterilización con la lámpara ultravioleta.

Para el sistema cerrado se midió el volumen drenado, la conductividad eléctrica y el pH del drenaje con un medidor de bolsillo combinado de la marca HANNA modelo HI98130. También se determinó para el sistema cerrado y abierto los parámetros de crecimiento, peso de fruto, sólidos solubles totales y rendimiento de igual forma que en el experimento dos.

El ahorro de agua en el sistema cerrado se determinó, dividiendo la cantidad de agua aplicada en los cinco riegos realizados con la solución lixiviada entre el total de riegos realizados en el día. Respecto al ahorro de fertilizantes, este se calculó determinando la cantidad de nutrientes (N, P, K y Ca) que se dejaban de aplicar con la solución nutritiva, al aplicar la solución lixiviada, dividiéndolo entre la cantidad total de nutrientes (N, P K y Ca) que contenía la lámina de riego diaria.

Finalmente se realizó un análisis de salinidad y calidad de agua al drenaje antes y después de hacerlo pasar por la lámpara ultravioleta para determinar la cantidad de nutrimentos que contenía el drenaje y si la lámpara ultravioleta afecta la concentración de nutrimentos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Experimento 1

4.1.1 Comportamiento de la Temperatura y Humedad Relativa

La temperatura así como la humedad relativa en la mayor parte del tiempo del cultivo no se mantuvieron dentro del rango que se considera óptimo para el cultivo del tomate (Figura 22a y 22b), lo que ocasionó problemas fisiológicos como enrollamiento de hojas, pudrición apical (Blossom end rot) y deformación de frutos por deficiente polinización en todos los tratamientos, es importante mencionar que en este invernadero (1080 m²) solo se contaba con ventilación natural como sistema de control ambiental, la cual consistió en apertura de ventanas durante el día para permitir intercambio de aire y cierre en las noches para conservar la temperatura.

Pérez y Castro (2011) mencionan que la temperatura óptima para el cultivo de tomate oscila entre 22 y 24 °C, y la humedad relativa debe variar de 50 a 60%; igualmente afirman que a temperaturas inferiores a 10°C ocurre enrollamiento de las hojas provocado por un desbalance en el metabolismo de la planta. A temperaturas superiores a 35 °C se detiene el crecimiento y se produce mala fecundación debido a la deshidratación del polen. Una humedad relativa alta (mayor al 70%) coadyuva a posibles daños fisiológicos como la pudrición apical

de los frutos por deficiencia de Calcio, ya que este elemento se absorbe mejor cuando existe transpiración normal de la planta.

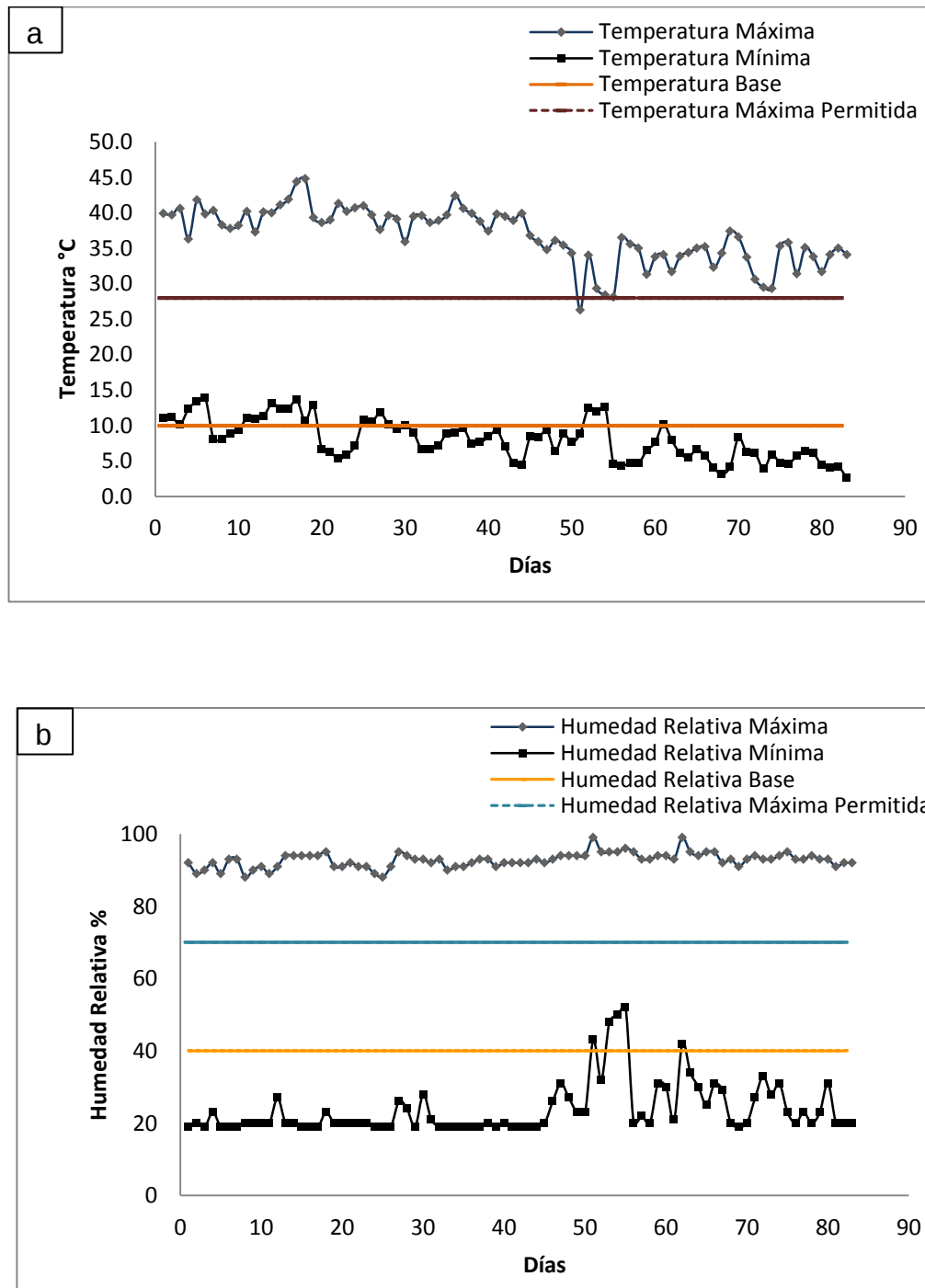


Figura 22. Temperatura máxima y mínima (a), humedad relativa máxima y mínima (b)

4.1.2 Comportamiento del volumen y conductividad eléctrica del drenaje

En la Figura 23a y 23b se observa que en los tratamientos uno y tres se mantuvo el volumen drenado alrededor del 30% casi todos los días del experimento, presentando para el tratamiento uno un máximo drenaje de 36% y para el tratamiento tres de 38%. En el tratamiento dos el volumen drenado fue variable (Figura 23c), encontrando valores de drenaje mínimos de 14.7% y máximos de 47.5%; por el contrario en el tratamiento cuatro el drenaje en la mayoría de los días del experimento se encontró por encima de 30% (Figura 23d).

Los valores de drenaje encontrados son similares a los reportados por Tüzel (2004) para toba volcánica (entre 31 y 36% de drenaje según las temporadas de cultivo) y por Uronen (1995) para lana de roca (entre 19 y 33% de drenaje) y para turba (10% de drenaje).

Según el análisis de varianza (Apéndice H), hay diferencias significativas entre tratamientos con $P \leq 0.05$, sin embargo al realizar comparación de medias (Cuadro 9), los tratamientos uno, dos y tres no presentan diferencias estadísticamente significativas en el porcentaje de drenaje. Solo se encontraron diferencias significativas en el tratamiento cuatro

respecto a los demás tratamientos para las dos etapas del cultivo evaluadas.

Cuadro 9. Comparaciones de medias para el porcentaje drenado en las dos etapas de cultivo evaluadas.

Tratamientos	% de Drenaje	
	0- 60 [†] DDT	60 DDT- Fin ciclo
T1	24.62 a *	21.69 a
T2	25.01 a	23.68 a
T3	25.85 a	22.50 a
T4	32.38 b	30.65 b
[‡] DMS	2.03	2.39

* Valores con diferente letra dentro de la misma columna indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey, ($P \leq 0.05$)

[‡]DMS=Diferencia mínima significativa. [†]DDT= días después del trasplante.

En todos los tratamientos durante los primeros 30 días de cultivo la conductividad eléctrica del drenaje presentó una diferencia máxima de 1 mS cm^{-1} con respecto a la conductividad eléctrica de la solución nutritiva excepto en el tratamiento dos en donde esta diferencia solo se presentó en los primeros 15 días. Posteriormente a los 15 días de trasplante la diferencia entre la conductividad eléctrica de la solución nutritiva y del drenaje superó la unidad en todos los tratamientos encontrando diferencias en el T1 de 1.88 mS cm^{-1} (Figura 22a), en el T2 de 3.02 mS cm^{-1} (Figura 22c), en el T3 de 3.3 mS cm^{-1} (Figura 22b) y en el T4 de 2.92 mS cm^{-1} (Figura 22d).

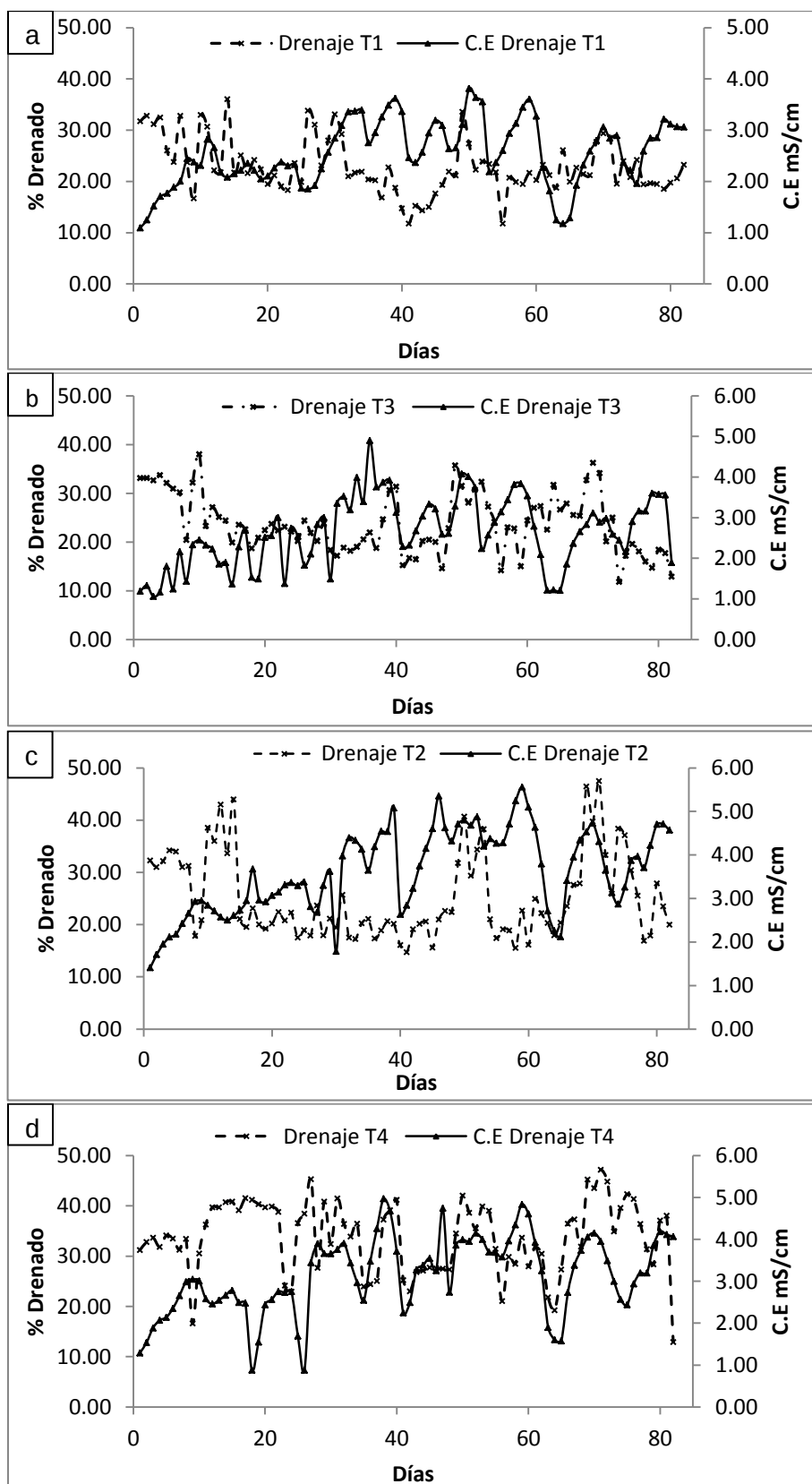


Figura 23. Comportamiento del porcentaje drenado y de la CE del drenaje T1 (a), T3 (b), T2 (c) y T4 (d)

Los resultados encontrados coinciden con los presentados por Savvas., *et al.* (2007) en los que trabajando con dos frecuencias de riego (baja y alta) y dos niveles de salinidad (baja y alta) en pepino encontraron que para ambos niveles de salinidad, la frecuencia de riego baja impuso inicialmente un aumento más rápido de la CE. Y por Oztekin., *et al.* (2008) en tomate bajo tres diferentes CE de la solución nutritiva (2, 4 y 6 dS m⁻¹) en donde los niveles de la CE del drenaje fueron más bajos durante las primeras semanas, aumentando a principios de la temporada de crecimiento. La CE promedio de la solución drenada en sistema abierto aumentó a 3.3, 5.4 y 7 dS m⁻¹ en otoño y 3.7, 7.1 y 10.7 en primavera para cada uno de los tratamientos.

El análisis de varianza (Apéndice G), muestra que para la primera etapa del cultivo (0-60DDT) no hay diferencias significativas en los tratamientos en los que la frecuencia de riego fue distinta, pero si las hay en los tratamientos donde la conductividad eléctrica fue diferente, lo cual se confirma al hacer la comparación de medias donde con un $P \leq 0.05$ hay diferencias significativas entre los tratamientos uno y dos y tres y cuatro (Cuadro 10). Para la segunda etapa del cultivo el análisis de varianza muestra diferencias significativas, que son confirmadas al hacer la comparación de medias encontrando diferencias entre todos los tratamientos, excepto entre el tratamiento uno y tres (Cuadro 10).

Cuadro 10.Comparaciones de medias para conductividad eléctrica del drenaje para dos etapas de cultivo evaluadas.

Tratamientos	C.E del Drenaje mS/cm	
	0- 60 [†] DDT	60DDT- Fin ciclo
T1	2.49 a*	3.02 a
T2	3.02 b	4.37 b
T3	2.36 a	2.89 a
T4	2.83 b	3.52 c
[‡] DMS	0.26	0.24

* Valores con diferente letra dentro de la misma columna indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey, ($P \leq 0.05$)

[‡]DMS =Diferencia mínima significativa. [†]DDT= días después del trasplante.

4.1.3 Índices de Crecimiento

En la figura 24a y 24b se observa que el tratamiento que obtuvo una mejor producción de biomasa fue el tratamiento dos, presentando un aumento del 21% en número de ramas y del 33% en número de hojas respecto al tratamiento tres que fue el tratamiento más deficiente.

Respecto a la altura de la planta, en el tratamiento dos fue 7 % menor que en el tratamiento cuatro, como se observa en la figura 24c. Al aplicar la misma conductividad eléctrica de la solución nutritiva, la frecuencia de riego no tiene inferencia sobre la altura de la planta. Hernández, *et al* (2005) reportan que la altura de la planta obtenida con frecuencias de riego de dos y cuatro riegos por día fue similar. Por otro lado comparando los tratamientos uno y dos donde se trabajó con igual frecuencia de riego pero diferente CE, se observa que la altura de la planta fue tan solo 1.5 % mayor en el tratamiento dos, manifestando que la CE tampoco tiene influencia significativa sobre esta variable.

Heuvelink (2005) menciona que el estrés salino (alta CE en el entorno de las raíces) no influye significativamente en la elongación del tallo en un rango de CE de 2 – 6.5 dS m⁻¹.

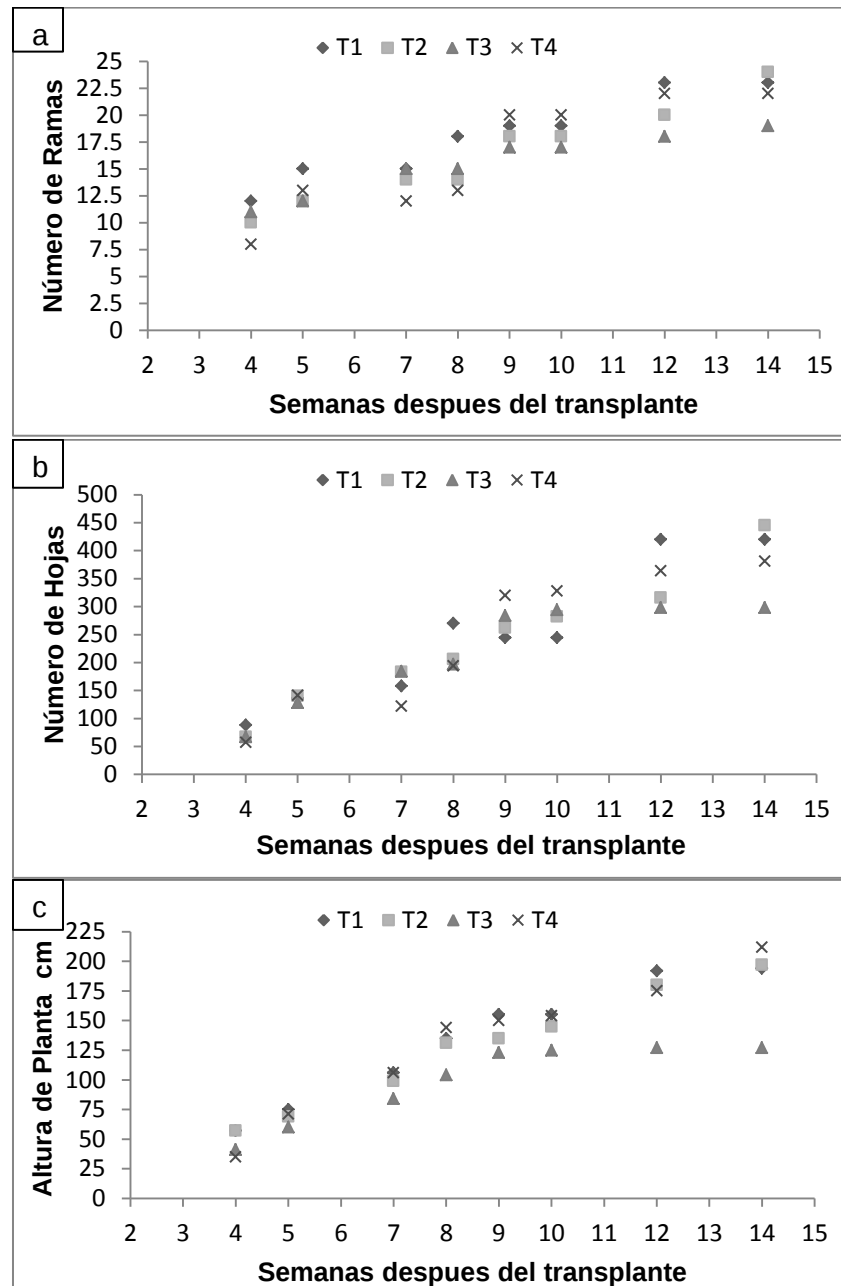


Figura 24. Comparación de número de ramas (a), número de hojas (b) y altura de la planta (c) por tratamiento.

Sin embargo al realizar el análisis de varianza (Apéndice H) para las variables de crecimiento se encuentra que con ($P \leq 0,05$) las diferencias entre los tratamientos no son estadísticamente significativas, lo cual se comprueba en la comparación de medias (Cuadro 11), solamente se presentan diferencias significativas para el grosor del tallo entre el tratamiento dos y los demás tratamientos.

Cuadro 11. Comparaciones de medias para índices de crecimiento

Tratamientos	Altura Cm	Nº Hojas	Nº Ramas	Grosor de Tallo mm
T1	110.81 a*	214.13 a	15.69 a	11.83 a
T2	128.44 a	241.00 a	17.19 a	14.11 b
T3	108.06 a	228.56 a	16.13 a	12.52 a
T4	121.50 a	228.38 a	15.38 a	12.50 a
T5	115.12 a	206.25 a	17.63 a	12.15 a
‡DMS	32.19	72.07	2.99	1.45

* Valores con diferente letra dentro de la misma columna indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey, $P \leq 0.05$. ‡DMS: Diferencia mínima significativa

4.1.4 Rendimiento y sus Componentes

El peso de los frutos fue afectado por los problemas de pudrición apical que se generan a causa de la deficiencia de calcio, debido a que una vez que el fruto es afectado por la enfermedad se detiene su crecimiento. McLaughlin y Wimmer (1999) reportan que el Ca es uno de los elementos esenciales para el crecimiento de las plantas y el desarrollo de los frutos.

Por lo anterior a pesar que los pesos promedio de fruto más altos se obtuvieron en los tratamientos dos y cuatro, también se presentó el mayor porcentaje de afectación de pudrición apical, causando de esta manera una disminución en la cantidad de frutos vendibles (Figura 25).

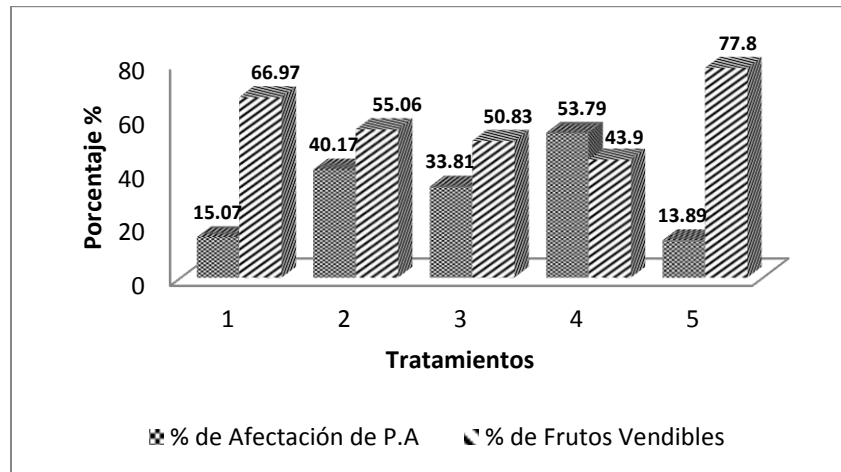


Figura 25. Porcentaje de frutos vendibles y afectación por pudrición apical

La mayor cantidad de frutos vendibles se obtuvo en el tratamiento cinco, al igual que la menor afectación por pudrición apical, esto se debió a que en todo el ciclo del cultivo solo se manejó una conductividad eléctrica evitando problemas de estrés salino. Napier y Combrink (2006) mencionan que una alta conductividad eléctrica en la zona de la raíz puede inducir problemas de pudrición apical, debido a que el efecto osmótico, limita la absorción de agua y Ca por las raíces.

En los tratamientos uno y dos donde se trabajó con frecuencias de riego altas se presentó mayor cantidad de frutos vendibles de 66.97 y 55.06%

respectivamente. En los tratamientos uno y tres donde se trabajó con conductividades eléctricas bajas la afectación por la pudrición apical fue menor. Napier y Combrink (2006) sugieren que para evitar el desarrollo de pudrición apical en tomates, la recomendación es asegurar que la conductividad eléctrica en el medio radical del tomate se mantenga por debajo de 3 mS cm^{-1} .

Teniendo en cuenta la NMX-FF-031-1997, tomates de tamaño mediano se obtuvieron en los tratamientos uno y tres, los cuales se clasifican como tomates de segunda calidad mientras que en los tratamientos dos y cuatro de tamaño grande, clasificados como tomates de primera calidad.

El tratamiento dos obtuvo el mayor rendimiento, siendo éste 7% mayor respecto al tratamiento uno en donde se trabajó con igual frecuencia de riego pero menor CE y 3.7 % mayor que en el tratamiento tres donde se trabajó con igual CE pero menor frecuencia de riego.

Al realizar el análisis estadístico (Apéndice H) se observa que para peso de fruto hay diferencias estadísticas significativas con $P \leq 0.05$, las cuales se confirman con la comparación de medias (Cuadro 12), en donde se encontró para frutos totales diferencias entre todos los tratamientos excepto entre el tratamiento tres y cinco. Considerando solo los frutos sanos y vendibles solamente los tratamientos tres y cinco fueron diferentes respecto a los demás tratamientos debido a que fue en estos tratamientos donde menor peso se presentó. En cuanto al rendimiento se determina que las diferencias que se

presentaron no son estadísticamente significativas. Estos resultados difieren de los reportados por Hernández, *et al* (2005), en donde al trabajar con frecuencias de riego de dos y cuatro riegos diarios, encontraron que no hay diferencias significativas en el peso promedio de frutos, pero si las hay en el rendimiento.

Cuadro 12. Comparación de medias para peso de frutos y rendimiento

Tratamientos	Peso Promedio de Frutos g			Rendimiento Ton /ha
	Totales	Sanos	Vendibles	
T1	148.54 a*	157.21 a	166.69 a	254.52 a
T2	174.54 b	167.79 a	189.30 a	273.69 a
T3	113.54 c	115.05 b	141.09 b	223.05 a
T4	173.68 b	170.68 a	174.76 a	263.58 a
T5	120.38 c	127.03 b	136.73 b	180.33 a
‡DMS	19.77	23.84	25.01	127.41

* Valores con diferente letra dentro de la misma columna indican diferencias significativa de acuerdo a la prueba de Tukey, $P \leq 0.05$. ‡DMS: Diferencia mínima significativa.

4.1.5 Sólidos solubles totales

En todos los tratamientos se encontró valores de sólidos solubles totales (SST) entre 5 y 8 °Brix, valores que se encuentran dentro del rango considerado como óptimo en cuanto a calidad para frutos de tomate similares a los encontrados por Aguayo y Artés (2004), con valores que variaban entre 4,5 y 5,5 °Brix.

En el tratamiento cinco y tres se presentaron los mayores valores de sólidos solubles totales, esto se debió a que en estos tratamientos se trabajó con frecuencias de riego bajas lo cual causa una acumulación de sales en la zona radicular, provocando estrés salino. Cornish (1992) probó el efecto del estrés

por sales sobre el aumento de los sólidos solubles totales, encontrando que en promedio la respuesta a la conductividad eléctrica en todos los tratamientos fue de 0.16 °Brix por cada mS cm^{-1} aumentado por encima del rango de conductividad eléctrica de control de 1.5- 2.0 ms/cm.

Según el análisis estadístico (Apéndice H) hay diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, lo cual se confirma al realizar la comparación de medias, encontrando diferencias significativas en los tratamientos donde se trabajó con igual frecuencia de riego pero diferente conductividad eléctrica (Cuadro 13). El promedio de SST de los frutos totales fue menor que el de los frutos sanos, debido a que los frutos afectados por la pudrición apical presentaron valores más bajos de SST que los no afectados.

Cuadro 13. Comparación de medias para sólidos solubles totales

Sólidos Solubles Totales °Brix		
Tratamientos	Frutos Totales	Frutos Sanos
T1	6.67 a*	6.52 a
T2	5.61 b	5.82 b
T3	7.45 c	7.88 c
T4	5.60 b	5.95 ab
T5	7.80 c	7.82 c
[‡] DMS	0.57	0.67

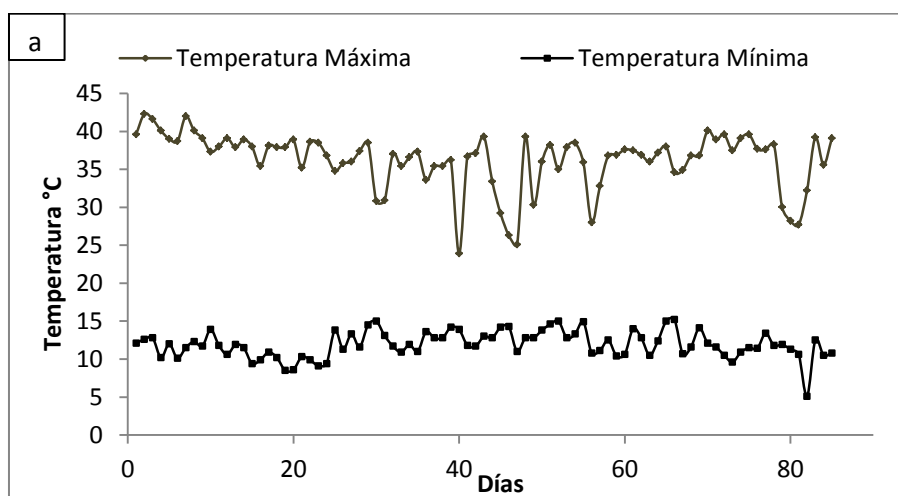
* Valores con diferente letra dentro de la misma columna indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey, $P \leq 0.05$.

[‡]DMS =Diferencia mínima significativa.

4.2 Experimento 2

4.2.1 Variables Ambientales

A pesar que en éste invernadero se utilizó en los primeros días de experimento nebulizadores para controlar la temperatura y humedad relativa, no se logró mantener la temperatura y humedad relativa dentro de los rangos que se consideran óptimos para el cultivo de tomate (Figura 26a y 26 b). Teniendo en cuenta lo mencionado por Jones (2005) que las plantas de tomate son sensibles a altas y bajas temperaturas, se hace importante contar dentro de los invernaderos con sistemas de control ambiental que permitan optimizar el desarrollo de la planta. Es importante mencionar que el higrómetro sólo indica el valor mayor y menor diario, de modo que no se puede determinar el tiempo de exposición del cultivo a estos valores extremos de temperatura y humedad relativa, lo que resulta más dañino para su crecimiento y desarrollo.



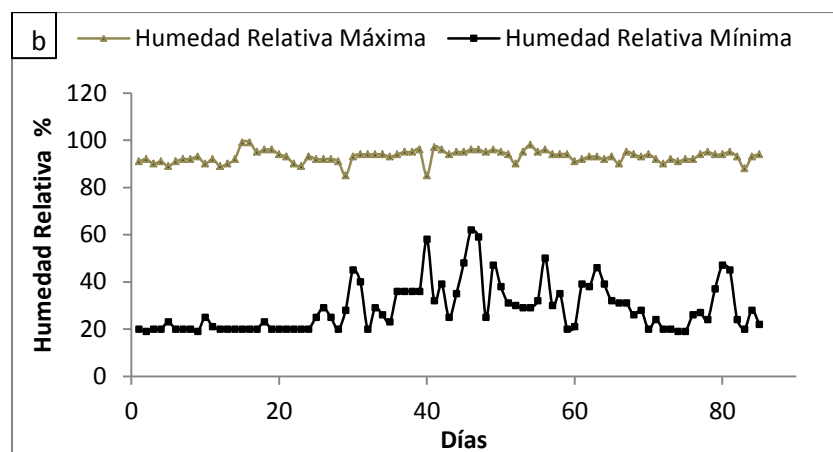


Figura 26. Comportamiento de la temperatura (a) y la humedad relativa (b) durante el experimento

En la Figura 27 se muestra la radiación fotosintéticamente activa (PAR) medida durante el experimento, observando que el valor mínimo de PAR presentado no fue inferior a $8 \text{ mol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, lo cual es importante ya que según Heuvelink y Dorais (2005) el requerimiento mínimo de luz para tomate es de $4 \text{ mol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Igualmente se puede observar que los días de mayor radiación fueron en los que se registró mayor temperatura promedio.

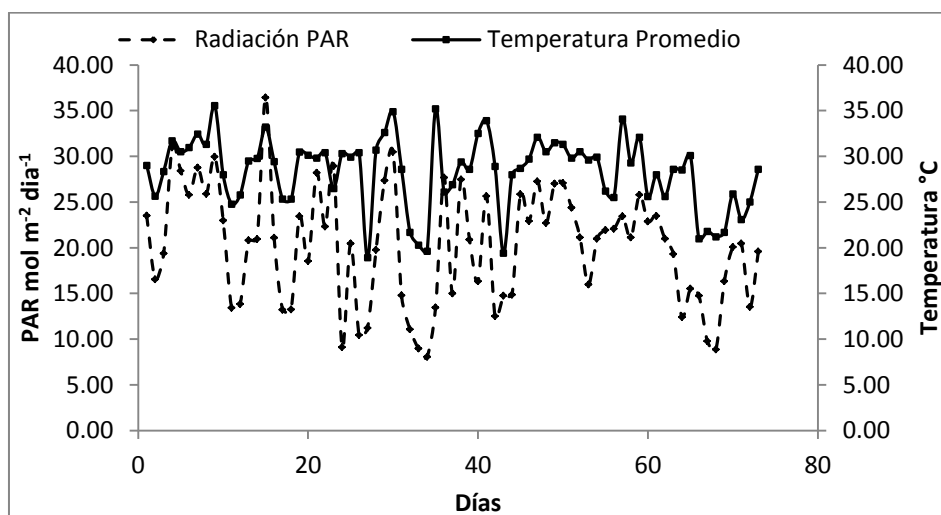
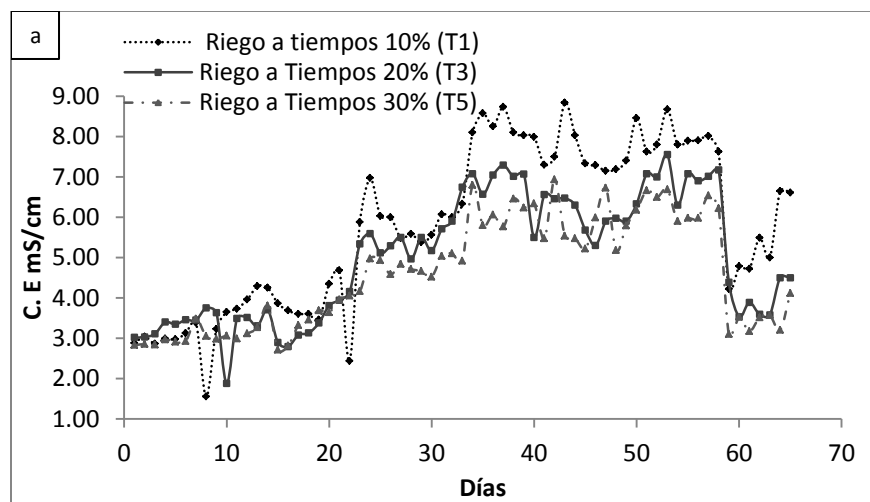


Figura 27. Comportamiento de la radiación fotosintéticamente activa (PAR)

4.2.2 Comportamiento del volumen y conductividad eléctrica del drenaje

En todos los tratamientos el volumen drenado se mantuvo alrededor del volumen estándar propuesto, mientras que la conductividad eléctrica del drenaje fue aumentando a medida que pasaban los días del experimento para todos los tratamientos, sin embargo los valores más altos de CE del drenaje se presentaron en los tratamientos en donde el porcentaje de drenaje fue tan solo el 10% sin importar el método de riego, encontrando valores superiores a 8 mScm^{-1} en los tratamientos uno y dos. En los demás tratamientos la CE fue menor, pero no se mantuvo en el rango considerado como máximo de diferencia entre la CE de la solución nutritiva y la CE del drenaje de 1 mScm^{-1} (Figura 28a y 28b).



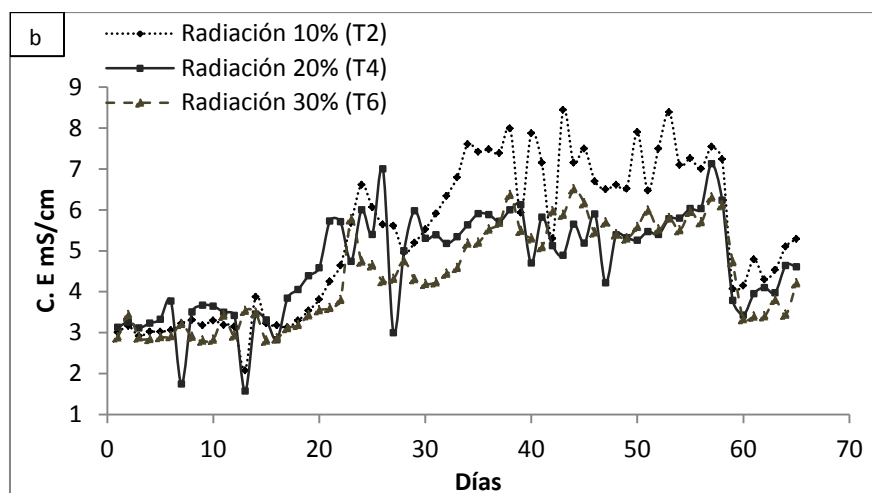
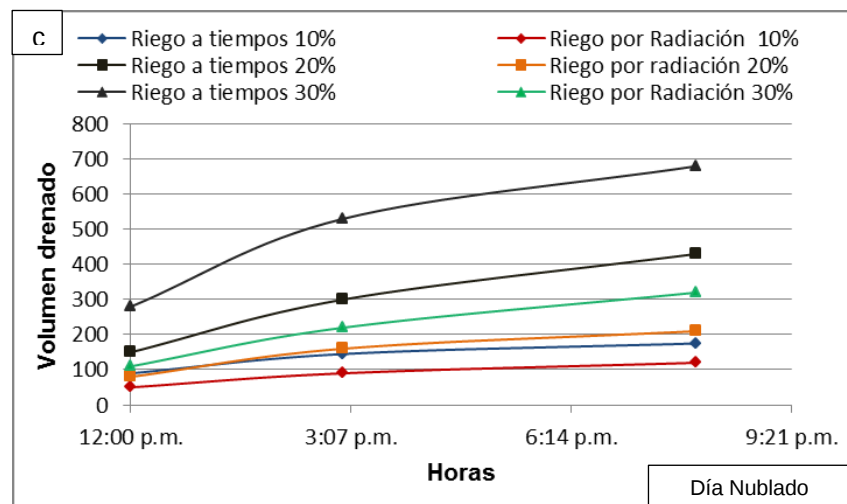
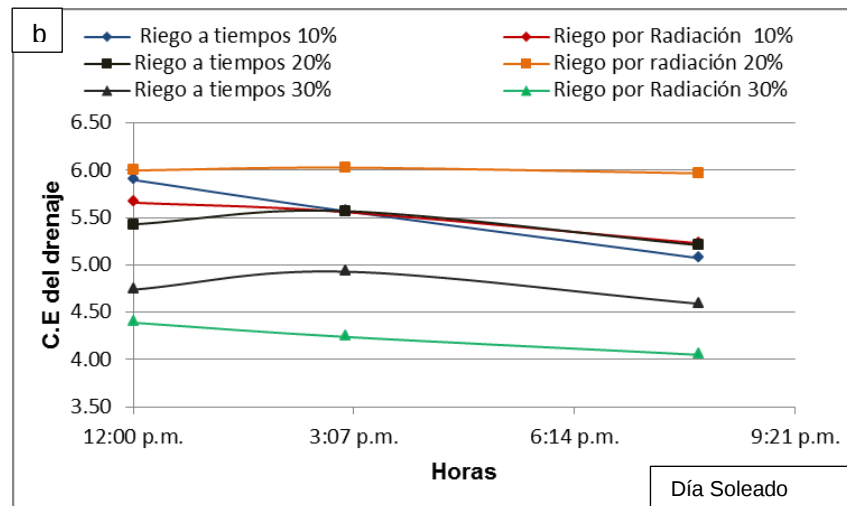
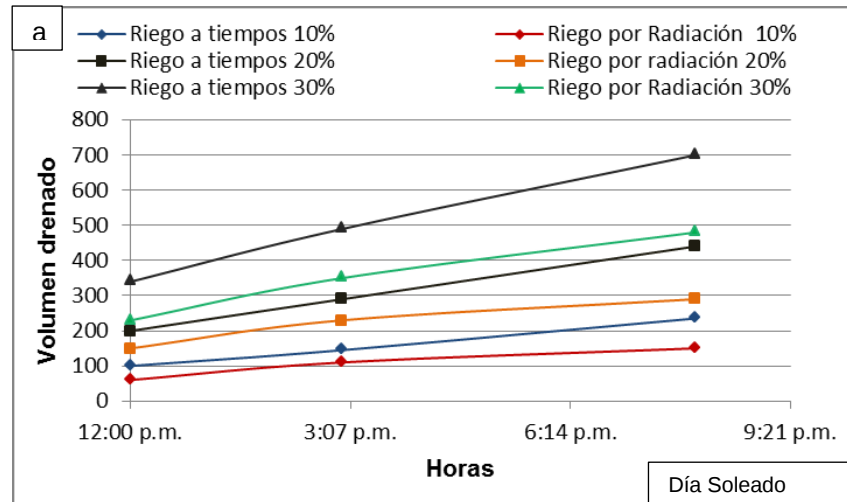


Figura 28. Comportamiento de la conductividad eléctrica del drenaje riego a tiempos (a) y riego por radiación (b)

Jones (2005) menciona que con conductividad eléctrica en la zona de raíces mayores a $4,0 \text{ dS m}^{-1}$, se requiere hacer lavados con agua para evitar que se presenten problemas por alta salinidad en la zona radical como: marchitamiento de plantas en los días de alta demanda atmosférica debido a la insuficiencia de agua está siendo absorbido por las raíces de las plantas para mantener la planta erecta.

Realizando una comparación del sistema de riego a tiempos y sistema de riego por radiación respecto al volumen drenado y CE del volumen drenado para un día soleado y nublado (Figura 29a, 29b, 29c y 29d) se puede observar que tanto para el día soleado como nublado el volumen drenado del sistema de riego por radiación fue menor que el riego a tiempos, esto se debe a que con este sistema de riego se aplicaba una lámina de riego inferior.



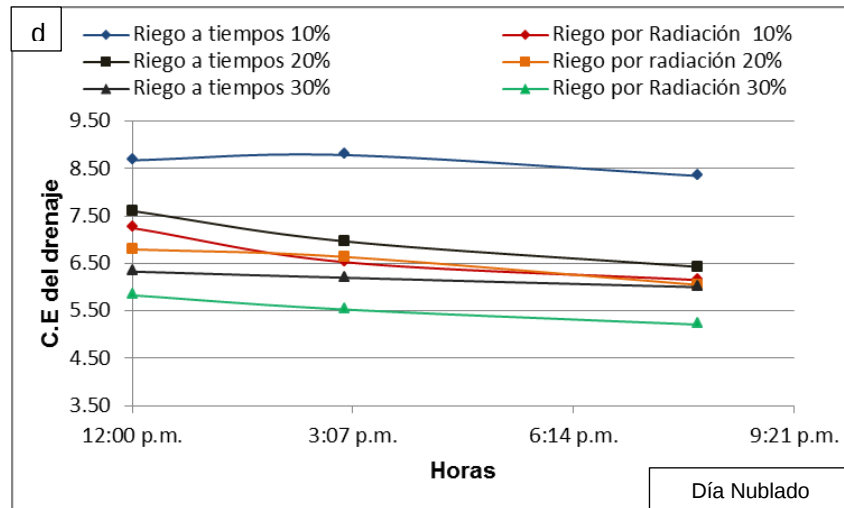


Figura 29. Volumen drenado para día soleado (a), conductividad eléctrica del drenaje para día soleado (b), Volumen drenado para día nublado (c), conductividad eléctrica del drenaje para día nublado (d)

En el día soleado el volumen drenado entre en medio día y las tres de la tarde para todos los tratamientos no aumentó considerablemente, esto se debe a que en estas tres horas es en donde se presenta la mayor radiación ocasionando que la planta absorba más nutrientes. En los días nublados el aumento del volumen drenado entre el medio día y las tres de la tarde fue alto en los tratamientos donde se trabajó con el sistema de riego a tiempos con 20 y 30% de drenaje, en los tratamientos en donde se usó el sistema de riego por radiación no se presentaron aumentos bruscos esto se debió a que en días nublados la cantidad de riegos diarios disminuía por ausencia de radiación. En los días nublados el volumen drenado del riego a tiempos con 20% de drenaje fue mayor al volumen drenado del riego por radiación con 10, 20 y 30% de drenaje.

La conductividad eléctrica del drenaje en días soleados presenta su mayor valor a las tres de la tarde como consecuencia de una disminución en el volumen drenado y debido a que entre el medio día y las tres de la tarde se presenta la mayor radiación y temperatura ocasionando que la planta absorba mayor cantidad de agua que de nutrientes. Peet (2005) menciona que cuando la temperatura del aire incrementa la tasa de absorción de agua incrementa más que la de nutrientes. Por el contrario en días nublados debido al mayor volumen de drenaje la conductividad eléctrica disminuye a lo largo del día en todos los tratamientos.

En las primeras etapas del cultivo la conductividad eléctrica del sustrato se encontró por debajo de 1 mS cm^{-1} , sin embargo la del drenaje para el mismo día estuvo alrededor de los 4 mS cm^{-1} , mostrando una gran diferencia entre la CE del sustrato y el volumen drenado, debido a que el volumen drenado contiene las sales lavadas y las sales propias de la solución nutritiva que no son absorbidas por la planta, provocando así un aumento de su CE final; para la segunda etapa del cultivo tanto la conductividad eléctrica del drenaje como la del suelo aumentaron como consecuencia del aumento de la C.E de la solución nutritiva, sin embargo la CE del suelo fue menor aproximadamente 2 mS cm^{-1} respecto a la del volumen drenado (Figura 30).

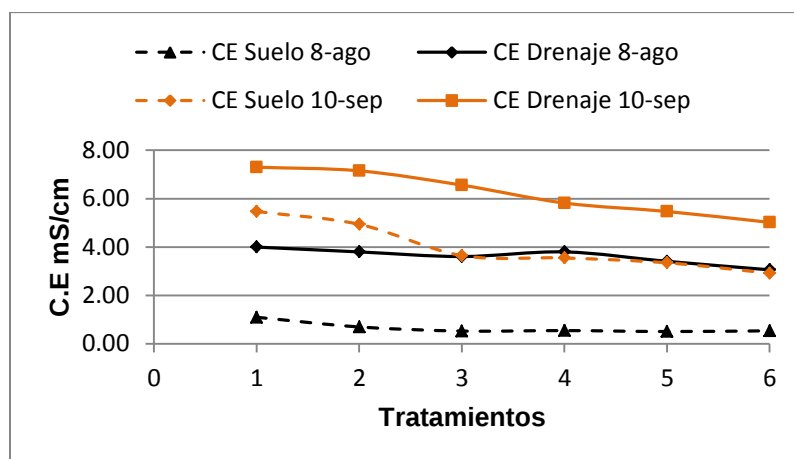


Figura 30. Conductividad eléctrica del sustrato y de la solución nutritiva lixiviada para dos días de cultivo.

Según el análisis de varianza (Apéndice I) tanto para el volumen drenado como para la conductividad eléctrica del drenaje se encuentran diferencias significativas solamente en los tratamientos en los que el porcentaje de drenaje fue diferente, mostrando de esta forma que el método de riego no afecta estas variables de respuesta. Lo cual se confirma al realizar la comparación de medias (Cuadro 14) en donde se observa que para el volumen drenado no se encontró diferencias significativas entre los tratamientos con diferente método de radiación e igual porcentaje de drenaje.

Respecto a la conductividad eléctrica del drenaje además de no haber diferencias significativas en los tratamientos en donde el método de riego fue diferente, tampoco las hubo en los tratamientos con porcentaje de drenaje de 20 y 30% para los dos métodos de riego.

Cuadro 14. Comparación de medias para volumen drenado y CE del drenaje

Tratamientos	Volumen drenado	CE de drenaje mS/cm
T1	132.80 a	5.78 a
T2	141.92 a	5.37 a
T3	270.60 bf	5.02 abc
T4	261.82 cf	4.71c
T5	421.00 dg	4.61 dc
T6	390.40 eg	4.44 ec
‡DMS	46.09	0.64

* Valores con diferente letra dentro de la misma columna indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey, $P \leq 0.05$. ‡DMS=Diferencia mínima significativa.

En relación a los dos métodos de riego utilizados se puede observar en la figura 31a y 31b que en el sistema de riego a tiempos se mantuvo el drenaje más cercano a los umbrales de 10, 20 y 30% establecidos, mientras que en el sistema de riego por radiación el drenaje, la mayor parte del tiempo estuvo por encima de los umbrales establecidos. Esto se debe principalmente a que con el riego a tiempos, los riegos ya estaban establecidos a lo largo del día permitiendo realizar el cierre del sistema de forma más exacta que en el riego por radiación. En esta medida para que el porcentaje de drenaje se mantenga en el sistema de riego por radiación se debe colocar el umbral de drenaje entre 3 y 5% más bajo que el requerido o se debe implementar un sistema que determine la lámina de riego aplicada por riego y calcule el volumen máximo de drenaje para cada umbral de drenaje del 10, 20 y 30% para cada riego.

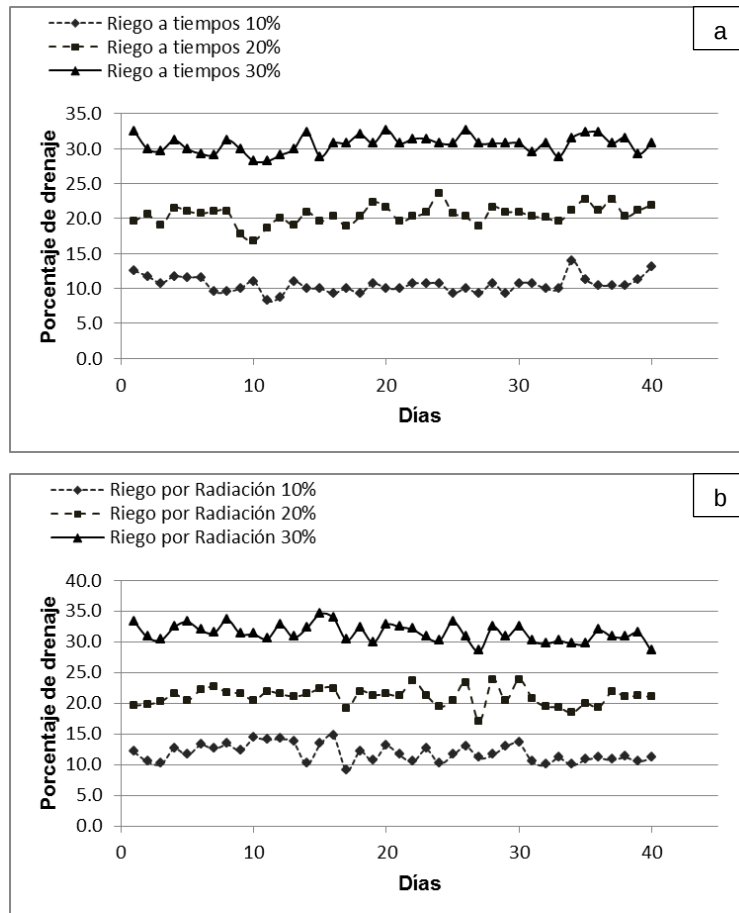


Figura 31. Porcentaje de drenaje para riego a tiempos (a) y Porcentaje de drenaje para riego por radiación (b)

4.2.3 Índices de Crecimiento

El tratamiento seis en donde se usó el método de riego por radiación con drenaje del 30% fue el que mayor altura de planta presentó, lo que posiblemente se debió a que al ser mayor el porcentaje de drenaje no se presentó déficit hídrico en estas plantas permitiendo su mejor crecimiento. Sin embargo según el análisis de varianza (Apéndice I) y la comparación de medias (Cuadro 15) se observa que esta diferencia sólo es significativa respecto al tratamiento uno y dos donde se trabajó con drenaje de 10%, de igual forma

también se presentaron diferencias significativas entre el tratamiento uno y dos. En los demás tratamientos la altura de tallo fue estadísticamente igual. Respecto al número de ramas igual que para altura de la planta las diferencias significativas se encontraron donde el porcentaje de drenaje fue diferente sin que el método de riego tuviese influencia; los demás índices de crecimiento no presentaron diferencias estadística significativas.

Cuadro 15. Comparación de medias para índices de crecimiento

Tratamientos	Altura Cm	Nº Ramas	Nº Frutos por Racimo	Grosor de Tallo mm	IAF
T1	147.46 a*	15.53 a	5.53 a	15.77 a	2.14 a
T2	124.66 b	15.26 a	5.33 a	16.13 a	2.04 a
T3	149.73 ac	15.13 a	5.13 a	16.10 a	2.19 a
T4	152.13 ac	14.33 ab	5.24 a	15.28 a	1.96 a
T5	141.53 ac	11.93 b	5.13 a	16.55 a	2.04 a
T6	157.53 ac	11.33 b	5.27 a	15.75 a	2.01 a
[‡] DMS	14.45	1.04	0.71	1.38	1.96 a

* Valores con diferente letra dentro de la misma columna indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey, $P \leq 0.05$.

[‡]DMS: Diferencia mínima significativa

4.2.4 Rendimiento y sus Componentes

En el tratamiento cuatro fue donde mayor número de frutos vendibles obtuvo, debido a que la afectación por la pudrición apical fue tan solo del 5.12%. El tratamiento dos fue el que menor cantidad de frutos vendibles presentó, debido a la menor cantidad de frutos producidos. Los tratamientos uno y cinco donde se trabajó con riego a tiempos con 10 y 30% de drenaje respectivamente, presentaron igual número de frutos totales. En el tratamiento uno el drenaje fue menor, por lo que aumentó la salinidad en la zona radicular causando una

afectación por pudrición apical mucho más alta que en el tratamiento cinco. Dicha pudrición fue de 21.78% y 5.44% en los tratamientos uno y cinco respectivamente, haciendo que el número de frutos vendibles fuera menor en el tratamiento uno (Figura 32). La reducción en la cantidad de frutos vendibles se debió exclusivamente a los frutos afectados por la pudrición apical, ya que no se presentaron frutos con pesos inferiores a 90 g, siendo el tratamiento uno el más afectado con un 78.22% de frutos vendibles y el menos afectado el tratamiento cuatro con 94.88% de frutos vendibles.

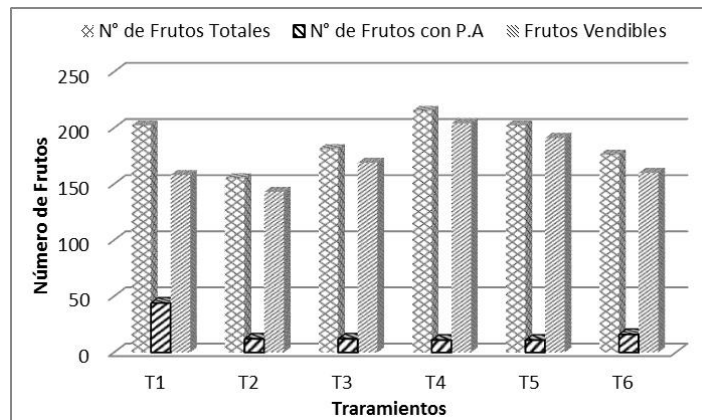


Figura 32. Frutos totales, vendibles y afectados por pudrición apical.

El método de riego por radiación PAR con un 20% de drenaje (tratamiento cuatro) presentó el mayor rendimiento y el mayor peso de frutos, sin embargo según la comparación de medias (Cuadro 16) respecto al peso de frutos éste solo presentó diferencias significativas con el tratamiento cinco, que fue el tratamiento con menor peso de frutos, en cuanto al rendimiento la diferencias significativa se dio en relación al tratamiento dos mostrando que al realizar riego por radiación PAR se afecta el rendimiento al disminuir el volumen de drenaje del 20 al 10%.

Cuadro 16. Comparación de medias para indicadores de producción experimento dos

Tratamientos	Peso de Frutos g	Tamaño de fruto (mm)	Número de Frutos por Corte	Sólidos Solubles Totales	Rendimiento Ton/ha
T1	189.18 a	71.02 a	28.80 a	5.08 a	259.8 a
T2	181.14 a	68.85 a	26.00 a	4.46 b	223.2 ac
T3	182.88 a	71.07 a	31.60 a	4.39 b	252.6 a
T4	195.59 ab	68.77 a	40.20 a	4.19 bc	285.3 ab
T5	176.29 ac	70.84 a	36.20 a	4.30 b	262.8 a
T6	182.87 a	69.49 a	31.00 a	4.57 bd	254.4 a
[‡] DMS	14.54	5.52	31.12	0.33	42.3

* Valores con diferente letra dentro de la misma columna indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey, $P \leq 0.05$.

[‡]DMS: Diferencia mínima significativa

En los tratamientos donde se realizó riego a tiempos, se presentó mayor tamaño de frutos debido a que hubo un suministro diario de agua sin tener en cuenta las condiciones climáticas, lo cual le permitía a la planta no sufriera estrés hídrico, sin embargo las diferencias no son significativas estadísticamente. En los que se realizó riego por radiación PAR mostraron mayor número de frutos por corte, sin embargo estas diferencias no fueron significativas con $P \leq 0.05$.

En la figura 33a y 33b se muestra para los cortes más representativos del experimento la distribución del tamaño de fruto para el sistema de riego a tiempos y sistema de riego por radiación con 10 20 y 30% de drenaje, observándose que en el corte del 01/10/2013 se recolectaron menor cantidad de frutos y los tamaños de fruto fueron menores (entre 60 y 70 mm) que en los

demás cortes, la mayor cantidad de frutos recolectados se presentó en el corte del 21/10/2013. En general la distribución de los tamaños de frutos para todos los cortes en los dos sistemas de riego se situó entre 60 y 90mm, sin embargo para el sistema de riego por radiación en el corte del 28/10/2012 el tamaño de frutos se situó entre 70 y 90mm. Según la NMX-FF-031-1997 para tomates tipo bola para comercialización nacional se considera que los frutos de los dos sistemas de riego son frutos de tamaño grande y para nivel de exportación se consideran frutos medianos y grandes.

La mayor cantidad de sólidos solubles se presentó en el tratamiento uno, lo cual se debió a que en este tratamiento se presentó alta salinidad en la zona radical. Peet (2005) menciona que cuando la salinidad es alta, pero no extrema, la calidad de la fruta y sólidos solubles aumentan con el aumento de la salinidad del suelo, al igual que en los sistemas de cultivo sin suelo.

Según Jones (2005), se consideran frutos de alto sabor los que tienen rangos de sólidos solubles entre 4.8 y 5.0 °Brix, por lo cual se puede decir que solamente los frutos del tratamiento uno están dentro de este rango, sin embargo el mismo autor menciona que el sabor puede ser un factor subjetivo, ya que no todo el mundo puede sentir lo mismo.

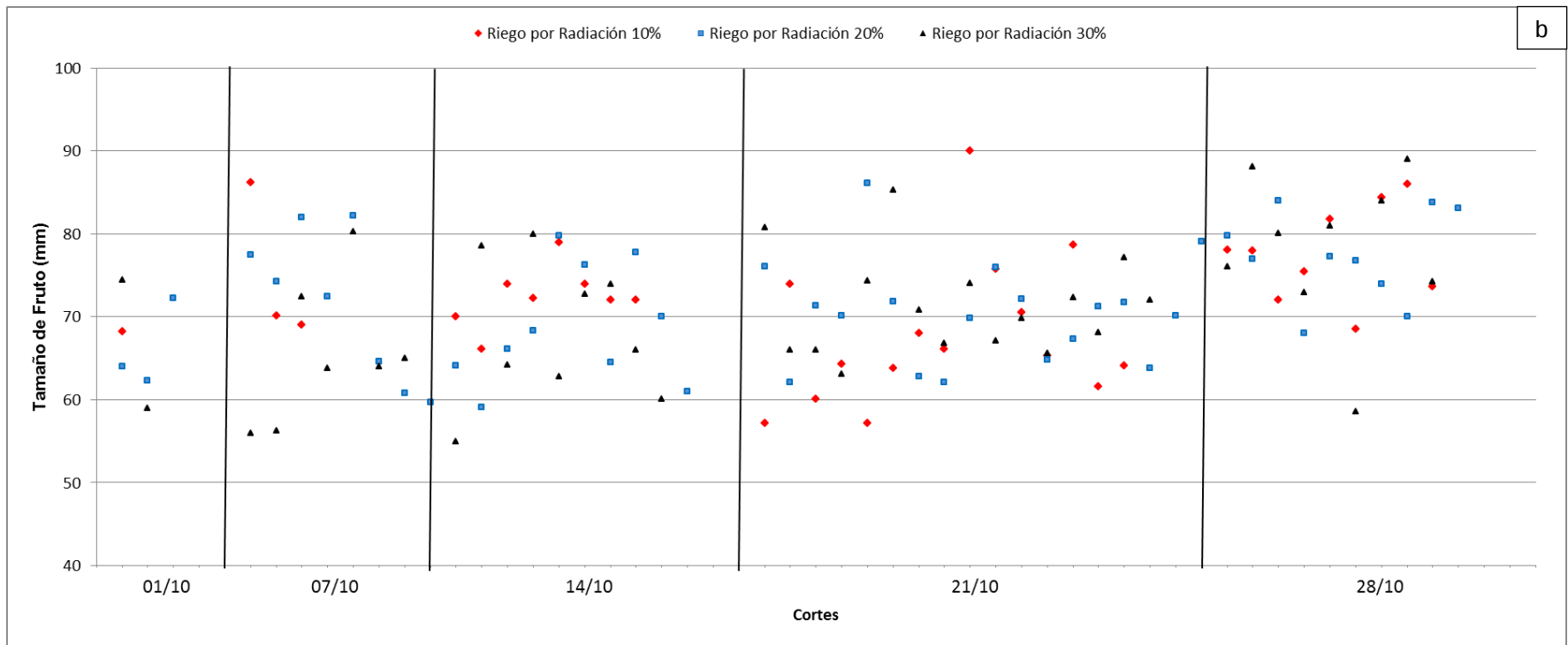


Figura 33. Distribución de tamaño de frutos para riego a tiempos (a), para riego por radiación (b)

4.2.5 Eficiencia en el Uso de Agua

El método de riego por radiación PAR con un 20% de drenaje fue el más eficiente en cuanto al uso del agua produciendo 23.21 g de frutos por litro de agua de riego (Figura 34). Resultados similares fueron encontrados por Fascella., *et al* (2010) quien encontró una mayor eficiencia en el uso del agua usando el método de riego por radiación comparándolo con método por temperatura y humedad relativa. El tratamiento más deficiente fue el tratamiento dos donde igualmente se usó método de radiación pero el drenaje fue de solo el 10% produciendo 18.61 g de fruto por litro de agua.

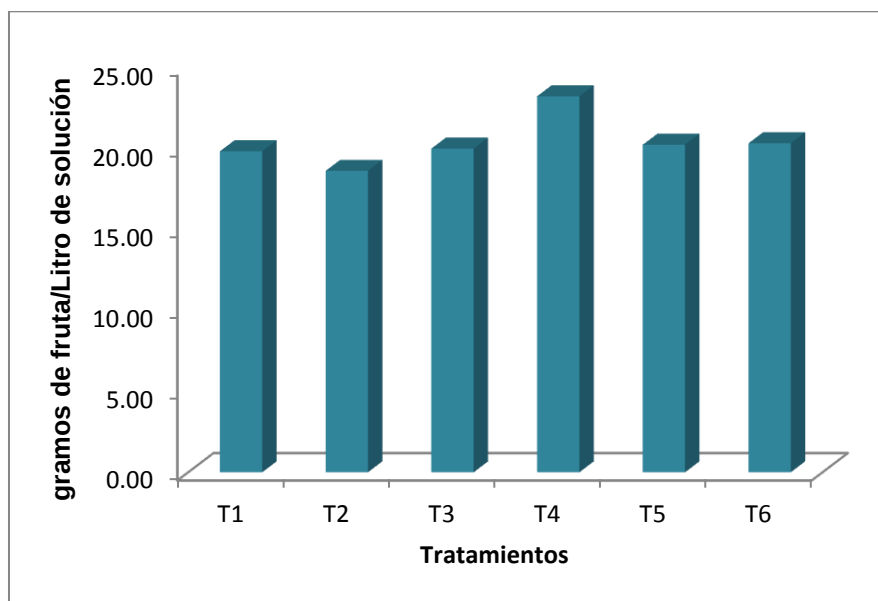


Figura 34. Eficiencia del uso del agua para cada tratamiento

En el tratamiento cinco y seis donde el drenaje se estableció en 30% fue donde mayor lámina de agua se aplicó y donde mayor desperdicio de agua se presentó (0.54 L y 0.48 L respectivamente), mientras que el mayor consumo de agua se presentó en los tratamientos uno y dos desperdiciándose solamente

0.16 L, lo cual se justifica, ya que en estos tratamientos sólo se permitió 10% de drenaje optimizando así el uso de agua.

Por otro lado se observa (Cuadro 17) que en los tratamientos donde se aplicó el riego por el método por radiación PAR (T2, T4 y T6), se aplicó menor lámina de agua por planta sin encontrar diferencias significativas respecto al rendimiento. Roh y Lee (1996), encontraron en experimentos donde controlaron la frecuencia de riego por la integral de radiación solar para pepino, que existe una alta correlación entre la radiación solar y la cantidad de agua absorbida por las plantas.

Según el análisis de varianza (Apéndice I) hay diferencias significativas entre tratamiento, lo cual se confirma con la comparación de medias (Cuadro 17), encontrando para agua aplicada diferencias significativas entre los tratamientos cinco y seis, dos y tres, dos y cinco, y uno y cinco; la mayoría de diferencias se da entre tratamientos con diferente porcentaje de drenaje pero igual método de riego, excepto los tratamientos cinco y seis donde se presentó diferencias significativas entre método de riego. Respecto al agua absorbida sólo hubo diferencias significativas entre el tratamiento seis (riego a tiempos con 30% de drenaje) y los demás tratamientos. Resultados similares fueron reportados por Tunali., *et al* (2009).

Cuadro 17. Comparación de medias para agua aplicada y agua absorbida

Tratamiento	Agua Aplicada L Planta ⁻¹ día ⁻¹	Agua Absorbida L Planta ⁻¹
T1	1.55 a	1.39 a
T2	1.42 ac	1.26 a
T3	1.65 ab	1.31 a
T4	1.56 a	1.23 a
T5	1.77 b	1.23 a
T6	1.55 a	1.07 b
‡DMS	0.19	0.16

* Valores con diferente letra dentro de la misma columna indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey, $P \leq 0.05$. ‡DMS: Diferencia mínima significativa

Si se recirculara el volumen drenado de cada uno de los tratamientos, asumiendo para los tratamientos de riego por radiación los riegos aplicados en un día intermedio, ocho riegos de tres minutos para un drenaje de 10, 20 y 30%, se obtendrían los ahorros de agua y fertilizantes que se muestran en el cuadro 18.

Cuadro 18. Ahorro de agua y fertilizantes asumiendo la recirculación del volumen drenado

Ahorro de	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Agua en %	9.56	9.89	19.88	20.91	31.05	30.37
N en %	9.56	9.88	19.87	20.94	31.04	30.40
P en %	9.56	9.88	19.87	20.94	31.04	30.40
K en %	9.56	9.88	19.87	20.94	31.04	30.40
Ca en %	9.56	9.88	19.87	20.94	31.04	30.40

Tanto los ahorros de agua como los de fertilizantes para cada sistema de riego se mantuvieron cercanos a los valores preestablecidos de drenaje.

4.3 Experimento 3

En el sistema cerrado se presentó en promedio un porcentaje de drenaje de 34.13%, una conductividad promedio de 4.50 mS cm^{-1} , y un pH de 6.22, mostrando los siguientes valores para cada etapa de cultivo: CE de 3.60 mS cm^{-1} , pH de 6.42 y drenaje de 31.66% para la primera etapa de cultivo (0-60DDT) y para la segunda etapa del cultivo (60-120DDT) CE de 5.11 mS cm^{-1} , pH de 6.08 y drenaje de 35.80% (Figura 35) estas mediciones se realizaron en el recipiente de recolección del drenaje. Estos resultados difieren de los presentados por Benko., *et al* (2011) que reportan conductividades promedio del drenaje de 3.5 dS m^{-1} , pH entre 5.9 y 8.6 y drenajes entre 18.7% y 54.2 trabajando con CE de la solución nutritiva de 2.3 dS m^{-1} , riegos por radiación y compensación de la solución nutritiva lixiviada mezclando en proporción 3:1 la solución nutritiva y solución lixiviada. Osuna (2011), también reporta un promedio de drenaje superior.

Es importante mencionar que la conductividad eléctrica del drenaje fue mayor que la reportada por otros autores debido a que en éste sistema cerrado no se realizó mezclas de solución lixiviada con solución fresca, ni se compensó los nutrientes perdidos. El manejo que se dio para tratar de compensar la alta conductividad eléctrica del drenaje fue aplicar los riegos con la solución lixiviada en las horas de la mañana (los 5 primeros riegos), donde hay menor radiación y temperatura logrando que la planta absorbiera mayor cantidad de nutrientes que de agua evitando que se salinizara demasiado el suelo.

En los días 12 y 28 se presenta una disminución considerable del porcentaje de drenaje causado por la alta radiación presentada en esos días, el día 28 se presentó la radiación PAR más alta para todo el experimento de 36.45 mol m^{-2} , por el contrario en los días 3 y 49 el drenaje aumentó, debido a la baja radiación, para el día 49 la radiación PAR fue de 14.07 mol m^{-2} .

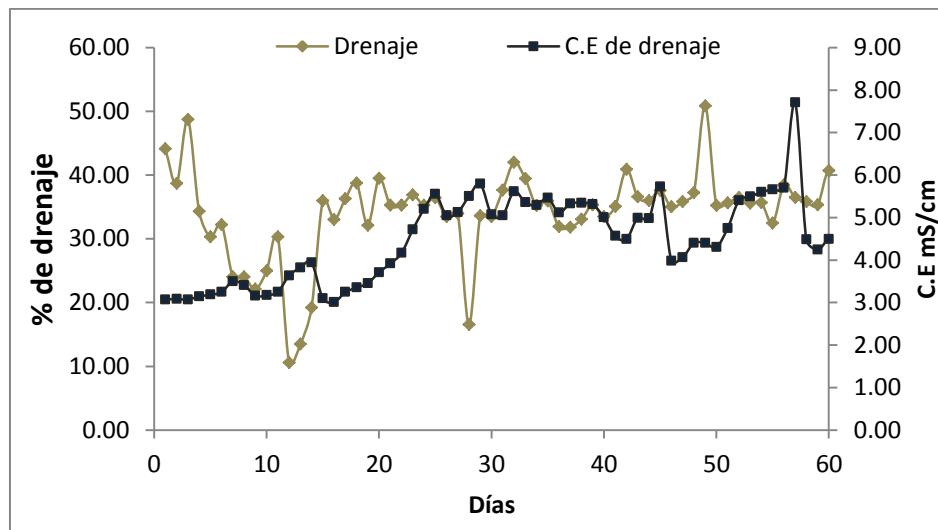


Figura 35. Comportamiento del porcentaje y conductividad eléctrica del drenaje para sistema cerrado

4.3.1 Índices de Crecimiento

Respecto a los parámetros de crecimiento (altura de la planta, número de ramas, grosor del tallo, número de frutos por racimo) no se presentaron diferencias estadísticas significativas entre el sistema cerrado (SC) y sistema abierto (SA) según el análisis de varianza (Apéndice J) y la comparación de medias (Cuadro 19) para un $P \geq 0.05$. Resultados similares fueron reportados por Osuna (2011) y Dasgan y Ekici (2005).

Cuadro 19. Comparación de medias para índices de crecimiento

Tratamiento	Altura de la Planta Cm	Grosor del Tallo mm	Nº de Ramas	Nº de Frutos por Racimo	IAF
SC	161.7 a	16.01 a	11.3 a	5.3 a	2.87 a
SA	160.1 a	15.44 a	11.5 a	5.1 a	2.77 b
‡DMS	10.44	1.3	0.9	0.5	0.094

* Valores con diferente letra dentro de la misma columna indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey, $P \leq 0.05$. ‡DMS: Diferencia mínima significativa

Si se compara el sistema abierto con los tratamientos manejados en el experimento dos que también se pueden considerar abiertos, se observa que el sistema abierto presentó menor número de ramas y menor grosor del tallo que los del tratamiento dos, esto pudo deberse a que los tratamientos del experimento dos se encontraban sobre una estructura que permitía la salida del drenaje sin que estuvieran en contacto con las raíces, mientras que en el sistema cerrado las bolsas estaban puestas directamente sobre el suelo (Figura 36) lo que impedía la salida rápida del drenaje, presentándose encharcamiento en la parte inferior de las bolsas. De igual forma las plantas del sistema cerrado se encontraban en la mitad del invernadero recibiendo sombra de las demás plantas.



Figura 36. Plantas del sistema abierto colocadas sobre el suelo

Se observa en la figura 36 que en la parte inferior de las bolsas se presenta algas debido al encharcamiento que se presenta por la lenta infiltración del drenaje al suelo. Cuando se colocan las plantas sobre el suelo se debe poner capas de arena y grava para permitir una mejor infiltración del drenaje y mitigar el impacto ambiental que causan los lixiviados al suelo y aguas subterráneas.

4.3.2 Rendimiento y sus componentes

El sistema cerrado presentó un rendimiento de 271.32 Ton/ha/año, mientras que en el sistema abierto el rendimiento fue de 203.94 Ton/ha/año, de igual forma en el sistema abierto se obtuvo menor cantidad y peso de fruto. Los rendimientos presentados para ambos sistemas son mayores a los reportados por Venezia., *et al* (2003), Dasgan y Ekici (2005) y Oztekin., *et al* (2008), y menores a los reportados por Tüzel., *et al* (2004) para ambos sistemas y por Benko., *et al* (2011) para sistemas cerrados.

En el sistema cerrado (SC) los indicadores de producción fueron mayores que en el sistema abierto (SA) (Cuadro 20), sin embargo estadísticamente solo se presentaron diferencias estadísticas en el rendimiento, número de frutos y peso promedio de los frutos, estos resultados difieren de los reportados por Osuna (2011), Tüzel., *et al* (2002) y Tüzel., *et al* (2001), quienes no encontraron diferencias significativas entre SA y SC respecto a peso de frutos y rendimiento. No obstante Tüzel., *et al* (2001) encontró diferencias significativas en número de frutos trabajando con sistemas cerrados y abiertos utilizando diferentes

mezclas de sustratos (perlita, toba volcánica, perlita + turba (4:1, v/v) y toba volcánica + turba (4:1, v/v).

Cuadro 20. Comparación de medias para indicadores de producción experimento tres

Tratamiento	Nº de Frutos / 8 cortes	Tamaño de Fruto mm	Peso de Fruto g	Afectación de Frutos por P.A %	Sólidos Solubles Totales	Rendimiento Ton /ha
SC	197 a	69.50 a	188.44 a	6.84 a	4.39 a	271.32 a
SA	154 b	70.07 a	168.47 b	5.54 a	3.96 b	203.94 b
[‡] DMS	22.48	3.1	8.48	3.01	0.2	27.45

* Valores con diferente letra dentro de la misma columna indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey, $P \leq 0.05$. [‡]DMS: Diferencia mínima significativa

Los sólidos solubles totales fueron mayores en el SC, presentando diferencias significativas, esto se debió a que indiscutiblemente en el sistema cerrado se genera un aumento de la salinidad en la zona radicular. Mitchell., *et al* (1991) reportan que el déficit de agua y la salinidad son factores importantes que determinan la calidad de fruto de tomate principalmente porque afectan la acumulación de agua en el fruto.

4.3.3 Uso Eficiente de Agua y fertilizantes

En el sistema cerrado (SC) se presentó mayor eficiencia en el uso del agua produciendo 18.79 g de frutos por litro de agua de riego (Figura 37), presentando diferencias estadísticas significativas con el sistema cerrado (SC).

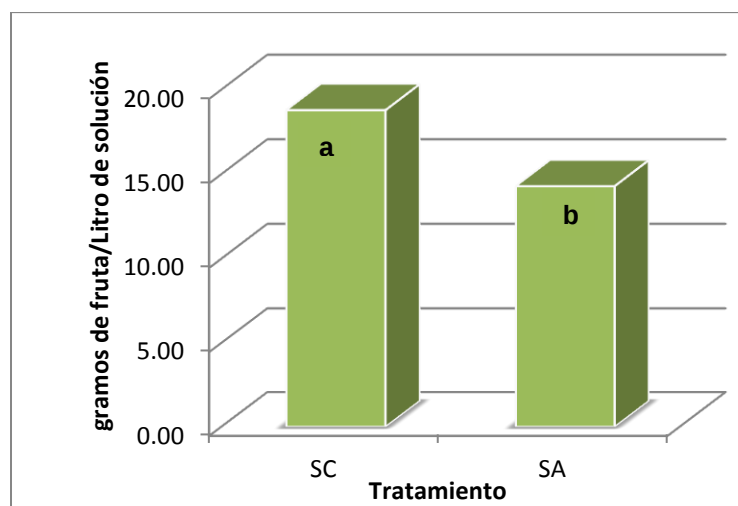


Figura 37. Eficiencia del uso del agua para cada sistema

Tunali *et al* (2009) reportan igual eficiencia (18.7 kg m^{-3}) en el periodo de primavera trabajando con CE de la solución nutritiva de 4 dS m^{-1} . Venezia., *et al* (2003) revelan mayor eficiencia en sistemas cerrados (22.73 g/L), pero menor en sistemas abiertos (12.82 g/L). Mientras que Meric *et al* (2011), Tüzel., *et al* (2004) y Guiffrida *et al* (2003) reportan mayores eficiencias tanto para periodo de primavera como de otoño.

En promedio el usar sistemas cerrados (SC) permitió un ahorro de 37.35% de agua y de 36.91% de fertilizantes (Cuadro 21). Valores de mayor ahorro fueron reportados por: García *et al* (2008), con ahorro de agua de 41.5% y de 70% de N, 71.5% de K y 73.4% de fósforo, Osuna (2011) con ahorros de N del 52%, de K del 48%, de P del 40% y de Ca del 48% y Benko., *et al* (2011) con 40.4% en ahorro de agua. Mientras que valores menores fueron reportados por: Tüzel., *et al* (2000) con promedios de 24% en ahorro de agua y 34% en ahorro de

fertilizantes y Tüzel., *et al* (2004) con ahorros de 30% de agua y 37% de fertilizantes.

Cuadro 21. Ahorro de agua y fertilizantes usando sistemas cerrados (SC)

Ahorro de	DDT *			Total del Ciclo
	0-30	31- 60	60-120	
Agua en %	41.67**	40.00	35.71	37.35
N en %	41.51	40.07	35.70	36.94
P en %	41.90	40.45	35.74	36.78
K en %	41.79	40.03	35.70	37.00
Ca en %	41.60	40.08	35.72	36.94

* DDT: Días después del trasplante

El mayor ahorro de agua y fertilizantes se presentó en los primeros 30 días de cultivo, debido a que un 41.66% del total de riegos se realizó con solución recirculada porque se aplicaban menor cantidad de riegos por día (12 riegos de 1 minuto), mientras que en la etapa de 31 a 60 DDT sólo se aplicó un 40% y en la etapa de 60 a 120 DDT un 35.71 % del total de riegos.

Respecto al análisis de nutrimentos de la solución nutritiva el sistema de desinfección no causó efecto sobre el pH, CE y cantidad de nutrientes nitrógeno (NO_3 y NH_4), fósforo, potasio y Calcio (Cuadro 22).

Cuadro 22. Concentración de nutrimentos para solución nutritiva lixiviada

Solución Lixiviada	C.E	pH	meq /L					mg/L
			K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	NH_4^+	NO_3^-	P
1	4.02	4.94	7.09	18.47	5.98	11	16.6	401.3
2	4.03	4.99	7.16	18.94	6.45	10.8	15.9	397.7

1. Solución drenada sin esterilizar

2. Solución drenada esterilizada

Cabe mencionar que las muestras de agua para éste estudio se realizaron en la segunda etapa del cultivo donde se aplicaba solución nutritiva con una conductividad eléctrica de la de 3.1 ms cm^{-1} y pH de 5.5. Por otro lado las cantidades de nutrientes que presenta la solución lixiviada se encuentran dentro del rango adecuado para tomate, razón por la cual visiblemente no se presentaron deficiencias de nutrimentos en el sistema cerrado.

4.3.4 Funcionamiento del Sistema Cerrado

Todos los días a las 7:30 de la mañana antes de que se iniciaran los riegos un timer activaba la bomba y la electroválvula para que el drenaje del día anterior fuera llevado al tanque elevado donde se almacenaba para su posterior desinfección. Después de manera manual se abría la llave del tambo elevado y se encendía la lámpara UV para que se desinfectara el drenaje. La solución lixiviada desinfectada se almacenó en el tambo que se encontraba en suelo de donde se tomaba la solución lixiviada para la recirculación, en éste proceso no se utilizó bombas hidráulicas, el flujo pasó de un tambo a otro por gravedad aprovechando la diferencia de alturas. Aunque las especificaciones de la lámpara mostraban un flujo nominal de 1 L min^{-1} , el flujo real que pasó por la lámpara UV fue de 0.78 L min^{-1} .

Aunque no se realizaron estudios microbiológicos de la solución lixiviada se puede decir que la lámpara UV fue eficiente en la desinfección de ésta, ya que no se presentaron problemas de raíces en las plantas del sistema cerrado.

5. CONCLUSIONES

Altas frecuencias de riego y conductividades eléctricas en la solución nutritiva en tomate generan mayor rendimiento y peso de fruto pero disminuyen la cantidad de frutos vendibles por causa de problemas fisiológicos como la pudrición apical. Sin embargo estadísticamente las diferencias no son significativas, igual que para los índices de crecimiento (altura de la planta, número de hojas y número de ramas).

El método de riego por radiación con 20% de drenaje genera mayor rendimiento (285.3 Ton/ha/año) y peso promedio de fruto (195.59 g), al igual que mayor cantidad de frutos vendibles (95%) y mejor eficiencia en el uso de agua produciendo 23.21 g de fruto por litro de agua respecto al método de riego temporizado y al mismo método de radiación con drenaje del 10 y 30%.

El uso de sistemas cerrados (SC) o sistemas abiertos (SA) no presenta diferencias estadísticas significativas respecto a los índices de crecimiento de la planta de tomate.

Con el uso de sistemas cerrados (SC) se obtuvo mayor rendimiento (271.32 Ton/ha/año), mayor peso promedio de fruto (188.44 g) y mayor cantidad de sólidos solubles totales (6.84 °Brix) respecto a sistemas abiertos (SA). Igualmente se produjo mayor cantidad de frutos por litro de agua que en los sistemas abiertos (18.79 g de fruto por litro de agua).

Usando sistemas cerrados (SC) se alcanzó un ahorro de agua de 37.35% y de 36.91% en nutrientes (N, P, K, Ca) comparado con los sistemas abiertos (SA).

Usando métodos de riego por radiación con 20% de drenaje en sistemas cerrados (recirculación de la solución nutritiva) para aguas de buena calidad se logra disminuir la contaminación por lixiviados sin afectar el rendimiento y calidad de los frutos de tomate.

Con la recirculación de la solución nutritiva se mejora significativamente el rendimiento y calidad de los frutos, obteniendo para sistemas cerrados 90.44 Ton/ha y 4.39 °Brix y para sistemas abiertos tan sólo 67.89 Ton/ha y 3.96 °Brix en 4 meses de cultivo.

Usando sistemas cerrados se aumenta el rendimiento en 22.55 Ton/ha en cuatro meses de cultivo y se reduce el uso de agua y fertilizantes en un 37.35% y 36.91% respectivamente, mientras que usando el método de riego por radiación PAR solamente no se afecta el rendimiento cuando se mantiene el

porcentaje de drenaje en 20%, logrando también un menor uso de agua de 43.08 litros de agua por kilogramo de fruto de tomate producido.

Los rendimientos obtenidos se encuentran cercanos al límite inferior dentro del rango de 200 a 500 Ton/ha/año reportado para invernaderos con tecnología media.

El sistema de riego temporizado mantiene el drenaje más cercano a los umbrales establecidos del 10, 20 y 30% que el sistema de riego por radiación, ahorrando de esta manera agua y fertilizantes.

RECOMENDACIONES

Se debe realizar un ajuste al umbral de radiación para la realización de los riegos o establecer un rango de radiación, para que no se presenten problemas de déficit hídrico por periodos muy largos entre riego y riego.

Para un mejor entendimiento del efecto de los métodos de riego sobre el crecimiento y productividad de las plantas se debe medir la tasa de transpiración y la fotosíntesis.

Se debe hacer muestreos destructivos para determinar el crecimiento de la planta, así como la cantidad de nutrimentos presentes en cada una de sus estructuras vegetativas y reproductivas.

Se debe determinar la acidez, la consistencia y la conductividad eléctrica de los frutos para tener más herramientas de análisis respecto a la calidad.

Para poder establecer diferencias contundentes entre las estrategias evaluadas se debe realizar experimentos en las diferentes estaciones del año y trabajar en invernaderos con ambientes controlados para no causar ruido a los resultados.

En futuros experimentos se debe garantizar que las plantas del sistema abierto tengan la misma capacidad de drenado que las del sistema cerrado.

Para poder implementar el control de riegos en invernaderos comerciales con el LabView se debe solucionar el problema que genera la alta humedad sobre los equipos, además se debe tener en cuenta el nivel educativo del productor para determinar las variables que se deben mostrar en el panel frontal.

Para mejorar las estrategias evaluadas en el presente trabajo de investigación se deben implementar modelos que otorguen mayor soporte científico a los resultados.

LITERATURA CITADA

Adams, P. 2004. Aspectos de la nutrición mineral en cultivos sin suelo, pp. 81-111. *In*: Tratado de cultivos sin suelo. Urrestarazu, G. M. (ed.). Mundi-Prensa. España.

Agribusiness CIA. LTDA. 2013. Semillas de tomate indeterminado. <http://www.linkagro.com/component/content/article/34-importadora-alaska-sa/241-semillas-de-tomate-indeterminado> Fecha de consulta: 24/Mayo/2013.

Aguayo, G.E; Artés, C.F. 2004. Elaboración del tomate mínimamente procesado en fresco. Ediciones de Horticultura S.L., Reus, España.

Backer, H y Hollowell. J. 2000. Use of Iodine for Water Disinfection: Iodine Toxicity and Maximum Recommended Dose. Environmental Health Perspectives. 108: 679-684.

Bauer, M.; Barney, L.D.; Robbbins. A.J. 2009. Growing tomatoes in cool, short-season locations. University of Idaho. 7 p.

Benko, B; Borosic, J; Novak. B; Toth. N; Fabek. S. 2011. Reuse of leached nutrient solution in tomato soilless culture. Acta Horticulture. 893: 1161-1166.

Bhat, R; Sujatha, S. 2008. Soil fertility and nutrient uptake by arecanut (*Areca catechu* L.) as affected by level and frequency of fertigation in a laterite soil. Agricultural water management. 96: 445-456.

Castilla, N. 1995. Manejo del cultivo intensivo con suelo, pp. 189-225. *In*: El Cultivo del Tomate. Nuez. F (ed.). Mundi-Prensa, España.

Castilla, N. 2012. Crop Physiology: Photosynthesis, Growth, Development and Productivity pp. 91-114 *in*: Greenhouse Technology and Management, 2nd Edition. CABI.

Castilla, N. 2012. Irrigation and Fertilization pp. 179-203 *in*: Greenhouse Technology and Management, 2nd Edition. CABI.

Cook R. y L. Calvin. 2005. Greenhouse tomatoes change the dynamics of the North American fresh tomato industry. Economic Research Report ERR2. United States Department of Agriculture (USDA).

Cornish, P.S.1992. Use of high electric conductivity of nutrient solution to improve the quality of salad tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) grown in hydroponic culture. Australian Journal of Experimental Agriculture. 32: 513-520.

Costa, P y Giacomelli. G. 2005. Ensuring success: Protected horticulture: productivity based on levels of technology. CEAC M-125933: 1-6.

Csizinszky; A.A. 2005. Production in the open field pp. 237-256. *In*: Tomatoes. Heuvelink. E. (ed.). Wageningen University, CABI Publishing, The Netherlands.

Dasgan, H. Y.; Ekici, B. 2005. Comparison of open and recycling systems for ion accumulation of substrate, nutrient uptake and water and water use of Tomato plants. Acta Hort. 697: 399-408.

Fascella, G; Agnello, S; Maggiore. P; Zizzo. G; Guarino.L. 2010. Effect of Controlled irrigation methods using climatic parameters on Yield and Quality of Hydroponic Cut Roses. Acta Horticulture. 870: 65-72.

Flores, D.; Ford, M. 2010. Mexico Tomato Annual Area Planted Down But Production Up. USDA, Foreign Agricultural Service. Global Agricultural information Network. USA. 8 p.

Flores. J, Ojeda. B. W. López. I, Rojano. A, Salazar. I. 2006. Requerimientos de riego para tomate de invernadero. Terra 25:127-134.

García. G. E; Leal. P. M; Jasso. G. E. 2008. Evaluación de dos sistemas hidropónicos (abierto y cerrado) con relación al uso de solución hidropónica reciclada y producción de jitomate de exportación. Tecnóloga 1: 54-66.

Garcia, M; Escobar, I; Salas. M. C; Urrestarazu. M. 2000. Effect of fertigation management on nutrient solution consumption and yield in a closed agrosystem in relation to an open system under Mediterranean plastic greenhouse conditions. Acta Horticulture. 511: 151-156.

García, M; Urrestarazu, M. (1998). La recirculación de la disolución nutritiva en el área mediterránea. Caja Rural de Granada. 171 pág.

Giuffrida, F.; Leonardi, C. 2009. Nutrient solution concentrations in soilless closed system. Acta Hort. 807: 463-468.

Giuffrida, F.; Lipari, V.; Leonardi, C. 2003. A simplified management of closed soilless cultivation systems. Acta Hort. 614: 155-160.

Handreck, K.A; Black, N.D. (1994). Growing media for ornamental plants and turf. University of new south wales press, Australia, 448 pág.

Hebbar, S.S; Ramachandrappa, B.K; Nanjappa, H.V; Prabhakar. 2003. M. Studies on NPK drip fertigation in field grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill). European journal of agronomy. 21: 117-127.

Hernández, Q; Sánchez, F; Peña, A; Montalvo, D. 2005. Sustratos y frecuencias de riego para la producción de tomate en hileras a diferente altura. Terra latinoamericana. 23: 341-349.

Heuvelink; E. 1996. Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis. Tesis Doctoral. Wageningen University. Netherlands. 326pp.

Heuvelink, E. y Dorais, M. 2005. Crop growth and yield. pp. 85-144. *In*: Tomatoes. Heuvelink. E. (ed.). Wageningen University, CABI Publishing, The Netherlands.

Heuvelink; E. 2005. Developmental processes pp. 53-83. *In*: Tomatoes. Heuvelink. E. (ed.). Wageningen University, CABI Publishing, The Netherlands.

INEGI. 2013. Exportaciones Inegi balanza agropecuaria. <http://www.inegi.org.mx/> Fecha de consulta: 24/Mayo/2013.

Jones, J. B. 2005. Hydroponic cropping, pp. 167-274. *In*: Hydroponics: a practical guide for the soilless grower. Jones, J. B. (ed.). CRS PRESS. USA.

Juárez, L. P; Bugarín, M.R; Sánchez, M.A; Balois, M.R, Juárez, R.C; Cruz, C.E. 2011. Horticultura protegida en Nayarit, México: Situación actual y perspectivas. Revista Bio Ciencias. 1: 16-24.

Keillor, G. 2008. Plant Characteristics and Physiology. pp.55-80 *In*: Tomato plant culture in the field, greenhouse and home garden. Jones, J. B. (ed.) CRC Press. Boca Raton, Fl. USA.

Kläring, H. P; Cierpinski, W.1998. Control of nutrient solution concentration depending on greenhouse climate in sweet pepper crop. Acta Horticulture, 458:141-146.

Mahajan, G; Singh, K.G. 2006. Response of greenhouse tomato to irrigation and fertigation. Agricultural water management. 84: 202-206.

Massa, D.; Incrocci, L.; Maggini, R.; Carmassi, G., Campiotti, C. A.; Pardossi, A. 2010. Strategies to decrease water drainage and nitrate emission from soilless cultura of greenhouse tomato. Agric. Water Manage 97: 971-980.

Mclaughlin, S.B; Wimmer, R.R. 1999. Calcium physiology and terrestrial ecosystem processes. *New Phytol.* 142: 373-417.

Meric, M.K; Tuzel, H.I; Oztekin.G.B. 2011. Effects of nutrition systems and irrigation programs on tomato in soilless culture. *Agricultural Water Management*, 99: 19-2.

Mitchell. J.P; Shennan. C; Grattan. S.R; May. D.M. 1991. Tomato fruit yields and quality under water deficit and salinity. *Soc. Hort. Sci.* 116(2): 215-221.

Miranda V. I; Gil. V. I; Bastidas. T. A; Reyes. R. S. D; Hernández. O. J; Morales. P. J; Flores. E. G. 2004. Manejo de Cultivos Hidropónicos Bajo Invernadero. Universidad Autónoma Chapingo. 213 p.

Mpusia, O. P. 2006. Comparison of Water Consumption between greenhouse and outdoor cultivation. ITC. The Netherlands.

Nakano, Y.; Sasaki, H.; Nakano, A.; Suzuki, K.; Takaichi, M. 2010. Growth and yield of Tomato plants as influenced by nutrient application rates with quantitative control in closed rockwool cultivation. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 79: 47-55.

Napier, D.R; Combrink, N.J. 2006. Aspects of calcium nutrition to limit plant physiological disorders. *Acta Horticulture.* 706: 107-116.

NMX-FF-031-1997. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano. Hortalizas frescas. Tomate (*lycopersicon esculentum mill.*) Especificaciones.

Nuez, F. 1999. El cultivo del tomate. Ediciones Mundiprensa. Madrid, España. 793 p.

Osuna R., J.M. 2011. Comparación de sistemas con y sin recirculación de la solución nutritiva en el cultivo hidropónico de jitomate. Tesis de maestría. Maestría en Horticultura.Universidad Autónoma Chapingo. México. 107pp.

Oztekin, G.B; Tüzel, Y; Tüzel. I. H; Meric. K.M. 2008. Effect of EC Levels of nutrient solution on tomato crop in open and closed systems. *Acta Horticulture.* 801: 1243-1250.

Páez, O. F.; Ramírez, R. G.; Ruiz, F. A. C.; Soto, J. M. F. 2007. Contaminación por nutrientes de las aguas costeras, pp. 55-67. In: La contaminación por nitrógeno y fósforo en Sinaloa: flujos, fuentes, efectos y opciones de manejo. Serie lagunas costeras de Sinaloa. Universidad Autónoma de México.

Papadopoulos, P.A. 1991. Environmental requirements. Pp. 13-15. *In: Growing greenhouse tomatoes in soil and in soilless media.* Agriculture Canada Publication. Canada.

Papadopoulos, P.A. 1991. Conventional cropping in soil. Pp. 40-46. *In: Growing greenhouse tomatoes in soil and in soilless media.* Agriculture Canada Publication. Canada.

Pardossi, A.; Incrocci, L.; Massa, D.; Carmassi, G.; Maggini, R. 2009. The influence of fertigation strategies on water and nutrient efficiency of tomato grown in closed soilless culture with saline water. *Acta Hort.* 807: 445-450

Peet; M.M. 2005. Irrigation And Fertilization pp. 171-198. *In: Tomatoes.* Heuvelink. E. (ed.). Wageningen University, CABI Publishing, The Netherlands.

Peet; M.M., Welles; G. 2005. Greenhouse Tomato Production pp. 257-304. *In: Tomatoes.* Heuvelink. E. (ed.). Wageningen University, CABI Publishing, The Netherlands.

Pérez. G. M; Castro. B. R. 2011. Jitomate en Invernadero. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco-Edo de México. 133 p.

Roh, M.Y y Lee. Y.B. 1996. Control of Amount and Frequency of Irrigation According to integral radiation in cucumber substrates culture. *Acta Hort.* 440: 332-337.

Runia, W. Th. 1994a. Elimination of Root-Infecting Pathogens in Recirculation Water from Closed Cultivation Systems by Ultra-Violet Radiation. *Acta Hort.* 361: 361-371.

Runia, W. Th. 1994b. Disinfection of Recirculation Water from Closed Cultivation Systems with Ozone. *Acta Hort.* 361: 388-396.

Runia, W. Th. 1995. A review of possibilities for disinfection of recirculation water from soilless cultures. *Acta Hort.* 382: 221-229.

SAGARPA 2012. Importancia de la agricultura protegida *In: Agricultura protegida 2012.* <http://2006-2012.sagarpa.gob.mx/agricultura/Paginas/Agricultura-Protegida2012.aspx>. Fecha de consulta: 25/septiembre/2013.

Sánchez, C. F.; Escalante, K. H. 1988. Hidroponía. 3ª ed. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 194 p.

Salas, S. M; Urrestarazu, G. M. 2004. Métodos de riego y fertirrigación en cultivo sin suelo pp. 161-237. *In: Tratado de cultivos sin suelo.* Urrestarazu, G. M. (ed.). Mundi-Prensa. España.

Savvas, D; Stamati, E; Tsirogiannis, E.L; Mantzas, N; Barouchas, P.E; Katsoulas, N; Kittas, C. 2007. Interactions between salinity and irrigation frequency in greenhouse pepper grown in closed-cycle hydroponic systems. *Agricultural water management*. 91: 102-111.

Sheen, T.F; Hsu, M.M. 1996. Studies on nutrient uptake by greenhouse muskmelon in hydroponic. En: *ISOSC proceedings*, pp. 491-503.

Sonneveld, C; Welles, G.W.H. (1988). Yield and quality of rockwool-grown tomatoes as affected by variations in EC- value and climatic conditions. *Plant and Soil*, 111:37-42.

Sonneveld; C. 2004. La nutrición mineral y salinidad en los cultivos sin suelo: su manejo pp. 305-367. *In: Tratado de cultivos sin suelo*. Urrestarazu, G. M. (ed.). Mundi-Prensa. España.

Tu, J.C; Harwood. B. 2005. Disinfestation of Recirculating Nutrient Solution by Filtration as a Means to Control Pythium Root Rot of Tomatoes. *Acta Hort*. 695: 306-307.

Tunali, U; Tüzel, I.H; Tüzel, Y. Öztekin.G.B. 2009. Effects of salinity on tomato in a closed system. *Acta Hort*. 807: 457-462.

Tüzel. I. H; Tüzel, Y; Irget, M. E; Gül, A; Meric. K.M. 2004. Effects of nutrition systems and irrigation programs on yield, water and nutrient consumption of tomato. *Acta Horticulture*. 659 : 549-556.

Tüzel, Y; Tüzel. I. H; Gül, A; Eltez. R; Akat. Ö. 2002. Comparison of open and closed systems on yield and quality of greenhouse grown tomatoes. *Acta Horticulture*. 579 : 585-590.

Tüzel. I. H; Tüzel, Y; Gül, A; Meric. K.M; Yavuz. Ö; Eltez. R. Z. 2001. Comparison of open and closed systems on yield, water and nutrient consumption and their environmental impact. *Acta Horticulture*. 554 : 221-228.

Urrestarazu, G. M. 2004. Bases y sistemas de los cultivos sin suelo, pp. 3-47. *In: Tratado de cultivos sin suelo*. Urrestarazu, G. M. (ed.). Mundi-Prensa. España.

Urrestarazu, G. M; Salas, S. M. 2004. Sistemas con sustrato y recirculación de la disolución nutritiva, pp. 369-421. *In: Tratado de cultivos sin suelo*. Urrestarazu, G. M. (ed.). Mundi-Prensa. España.

Uronen, K.R. 1995. Leaching of nutrients and yield of tomato in peat and rockwool with open and closed system. *Acta Horticulture*. 401: 443-449.

Van Os. E.A. 2010. Disease Management in Soilless Culture Systems. Acta Hort. 883: 385-394.

Van Os. E.A. 2009. Comparison of Some Chemical and Non-Chemical Treatments to Disinfect a Recirculating Nutrient Solution. Acta Hort. 843: 229-234.

Van Os. E.A; Amsing. J.J; Van Kuik. J.A; Willers. H. 1999. Slow sand filtration: a potential method for the elimination of pathogens and nematodes in recirculating nutrient solutions from glasshouse-grown crops. Acta Hort. 481: 519-516.

Venezia. A; Tonini. A; Piro. F; Di Cesare. C; Schiavi.M. 2003. Water and nutrient use efficiency of tomato soilless culture as affected by irrigation method and water quality. Acta Hort. 609: 417-421.

Willits, D. H. 2003. The Penman-Monteith equation as a predictor of transpiration in a greenhouse tomato crop. ASAE Annual International Meeting. Paper 034095. Las Vegas, NV, USA.

Wohanka. W. 1995. Desinfection of recirculating nutrient solutions by slow sand filtration. Acta Hort. 382: 246-255.

Apéndice A. Cálculo de frecuencia y dotación de riego a tiempos experimento 1.

Parámetro considerado	Valor
Porcentaje del agua total disponible del sustrato (atd)	24.55%
Volumen del contenedor (Vc)	12 L
N° de goteros por contenedor (ng)	1
Caudal nominal del gotero (c)	3.9 L h ⁻¹
Porcentaje de drenaje deseado (d)	30%
Número de plantas por contenedor (np)	1
Porcentaje de volumen de agua disponible que consumen las plantas tras el cual se desea iniciar un nuevo riego (ac)	5%

Cálculo de lámina de 0- 60 DDT

1 Volumen total de agua disponible (ats)

$$\text{ats} = \text{atd} * \text{Vc}$$

$$\text{ats} = 24.55\% * 12 \text{ L} \quad \text{ats} = \mathbf{2.946 \text{ L}}$$

2 Volumen de gasto por contenedor (Vac)

$$\text{Vac} = \text{ac} * \text{ats}$$

$$\text{Vac} = 5\% * 2.946 \text{ L} \quad \text{Vac} = 0.147 \text{ L} = \mathbf{147 \text{ ml}}$$

3 Consumo de agua diario de 0-60DDT (Cd)

$$\text{Cd} = 780 \text{ ml planta día}^{-1}$$

4 Consumo por horas (Ch)

Teniendo en cuenta 9 horas del día para realizar riegos

$$\text{Ch} = 780 \text{ ml planta día}^{-1} / 9 \text{ h} \quad \text{Ch} = \mathbf{86.67 \text{ ml planta h}^{-1}}$$

5 Consumo por minuto (Cm)

$$\text{Cm} = 86.67 \text{ ml planta h}^{-1} / 60 \text{ min} \quad \text{Cm} = \mathbf{1.44 \text{ ml planta min}^{-1}}$$

6 Consumo por planta (Cu)

$$\text{Cu} = \text{Cm} * \text{np} \quad \text{Cu} = 1.44 \text{ ml planta min}^{-1} * 1 \text{ planta}$$

$$\text{Cu} = \mathbf{1.44 \text{ ml min}^{-1}}$$

7 Tiempo entre riegos (ti)

$$\text{ti} = \text{Vac} / \text{Cu} \quad \text{ti} = 147 \text{ ml} / 1.44 \text{ ml min}^{-1} \quad \text{ti} = \mathbf{102 \text{ min}}$$

9 Dotación de cada riego (V)

$$V = V_{ac} / ((1-d))$$

$$V = 147 \text{ ml } (1-0.3) \quad \mathbf{V=210 \text{ ml planta-1}}$$

8 Número de riegos (nr)

$$nr = 9h * (60 \text{ min} / ti) \quad nr = 9h * (60 \text{ min} / 102 \text{ min})$$

$$\mathbf{nr = 5.29 \text{ riegos}}$$

10 Tiempo de riego (tr)

$$tr = V / c(\text{ml min}^{-1}) \quad tr = 210 \text{ ml} / 65 \text{ ml min}^{-1} \quad \mathbf{tr = 3.2 \text{ min}}$$

Éstos cálculos fueron ajustados buscando una mejor distribución en el día a **nr = 6 riegos, ti = 60 min y tr = 2.5 min**, debido a que el tiempo de riego calculado era muy alto y podía ocasionar problemas de estrés hídrico

Cálculo de lámina de 60 DDT- fin de ciclo**1 Volumen total de agua disponible (ats)**

$$ats = atd * Vc$$

$$ats = 24.55\% * 12 \text{ L} \quad \mathbf{ats = 2.946L}$$

2 Volumen de gasto por contenedor (Vac)

$$Vac = ac * ats$$

$$Vac = 5\% * 2.946L \quad Vac = 0.147 \text{ L} = \mathbf{147 \text{ ml}}$$

3 Consumo de agua diario de 60DDT- fin de ciclo (Cd)

$$Cd = 1800 \text{ ml planta día}^{-1}$$

4 Consumo por horas (Ch)

Teniendo en cuenta 9 horas del día para realizar riegos

$$Ch = 1800 \text{ ml planta día}^{-1} / 9 \text{ h} \quad \mathbf{Ch = 200 \text{ ml planta h}^{-1}}$$

5 Consumo por minuto (Cm)

$$Cm = 200 \text{ ml planta h}^{-1} / 60 \text{ min} \quad \mathbf{Cm = 3.33 \text{ ml planta min}^{-1}}$$

6 Consumo por planta (Cu)

$$Cu = Cm * np \quad Cu = 3.33 \text{ ml planta min}^{-1} * 1 \text{ planta}$$

$$\mathbf{Cu = 1.44 \text{ ml min}^{-1}}$$

7 Tiempo entre riegos (ti)

$$ti = Vac / Cu \quad ti = 147 \text{ ml} / 3.33 \text{ ml min}^{-1} \quad \mathbf{ti = 44 \text{ min}}$$

8 Número de riegos (nr)

$$nr = 9h * (60 \text{ min} / ti) \quad nr = 9h * (60 \text{ min} / 44 \text{ min})$$

$$\mathbf{nr = 12.27 \text{ riegos}}$$

9 Dotación de cada riego (V)

$$V = V_{ac} / ((1-d))$$

$$V = 147 \text{ ml } (1-0.3) \quad \mathbf{V=210 \text{ ml planta-1}}$$

10 Tiempo de riego (tr)

$$tr = V / c(\text{ml min}^{-1}) \quad tr = 210 \text{ ml} / 65 \text{ ml min}^{-1} \quad \mathbf{tr = 3.2 \text{ min}}$$

Para éstos cálculos solo se ajustó en tiempo entre riegos **ti= 40 min** dejando igual **nr = 12 riegos y tr = 3 min**

Cálculo de lámina de 60 DDT- fin de ciclo

1 Volumen total de agua disponible (ats)

$$\text{ats} = \text{atd} * \text{Vc}$$

$$\text{ats} = 24.55\% * 12 \text{ L} \quad \text{ats} = \mathbf{2.946L}$$

2 Volumen de gasto por contenedor (Vac)

$$\text{Vac} = \text{ac} * \text{ats}$$

$$\text{Vac} = 5\% * 2.946L \quad \text{Vac} = 0.147 \text{ L} = \mathbf{147 \text{ ml}}$$

3 Consumo de agua diario de 60DDT- fin de ciclo (Cd)

$$\text{Cd} = 1800 \text{ ml planta día-1}$$

4 Consumo por horas (Ch)

Teniendo en cuenta 9 horas del día para realizar riegos

$$\text{Ch} = 1800 \text{ ml planta día-1} / 9 \text{ h} \quad \text{Ch} = \mathbf{200 \text{ ml planta h-1}}$$

5 Consumo por minuto (Cm)

$$\text{Cm} = 200 \text{ ml planta h-1} / 60 \text{ min} \quad \text{Cm} = \mathbf{3.33 \text{ ml planta min-1}}$$

6 Consumo por planta (Cu)

$$\text{Cu} = \text{Cm} * \text{np} \quad \text{Cu} = 3.33 \text{ ml planta min-1} * 1 \text{ planta}$$

$$\text{Cu} = \mathbf{1.44 \text{ ml min-1}}$$

7 Tiempo entre riegos (ti)

$$\text{ti} = \text{Vac} / \text{Cu} \quad \text{ti} = 147 \text{ ml} / 3.33 \text{ ml min-1} \quad \text{ti} = \mathbf{44 \text{ min}}$$

8 Número de riegos (nr)

$$\text{nr} = 9\text{h} * (60 \text{ min} / \text{ti}) \quad \text{nr} = 9\text{h} * (60 \text{ min} / 44 \text{ min})$$

$$\text{nr} = \mathbf{12.27 \text{ riegos}}$$

9 Dotación de cada riego (V)

$$\text{V} = \text{Vac} / ((1-\text{d}))$$

$$\text{V} = 147 \text{ ml} (1-0.3) \quad \text{V} = \mathbf{210 \text{ ml planta-1}}$$

10 Tiempo de riego (tr)

$$\text{tr} = \text{V} / \text{c}(\text{ml min-1}) \quad \text{tr} = 210 \text{ ml} / 65 \text{ ml min-1} \quad \text{tr} = \mathbf{3.2 \text{ min}}$$

Para éstos cálculos solo se ajustó en tiempo entre riegos **ti= 40 min** dejando igual **nr = 12 riegos y tr = 3 min**

Apéndice B. Programa en lenguaje C para microcontrolador Atmel 80c51

```
#include <reg51.h>

sbit V1 = P2^1;
sbit V2 = P2^3;
sbit V3 = P2^4;
sbit V4 = P2^5;
sbit V5 = P2^6;
sbit BOMBA = P2^2;

void delay()
{
    unsigned char d,f;

    for(f = 0; f < 60; f++) //Retardo de 1 minuto
        for(d=0;d<=20;d++) //Genera retardo de 1 segundo
        {
            TMOD = 0x01;
            TL0 = 0xFD;
            TH0 = 0x45;
            TR0 = 1; // start timer.
            while(TF0 == 0); // run until TF turns to 1
            TR0 = 0; // stop timer
            TF0 = 0; // reset the flag
        }
    }

}

void main(void)
{
    unsigned char i,j;
    void delay();
```

//Los contadores se inician en 0 y se van incrementando hasta completar su ciclo de trabajo (tiempo On + tiempo Off)

```
unsigned char V1_On = 0; // 2 on y 45 Off
unsigned char V2_On = 0; // 2 On y 45 Off
unsigned char V3_On = 0; // 3 On y 60 Off
unsigned char V4_On = 0; // 3 On y 60 Off
unsigned char V5_On = 0; // 5 On y 60 Off
unsigned char Ons_V1 = 0; // 10 riegos de 2 min
unsigned char Ons_V2 = 0; // 10 riegos de 2 min
unsigned char Ons_V3 = 0; // 7 riegos de 3 min
unsigned char Ons_V4 = 0; // 7 riegos de 3 min
unsigned char Ons_V5 = 0; // 8 riegos de 5 min
```

```
P1=0;
```

```
P2=0;
```

```
P3=0;
```

```
while(1)
```

```
{
```

```
    //Encendido y apagado de Válvula 1
```

```
    if (V1_On < 2 && Ons_V1 < 45)    //la Válvula 1 Se mantiene encendida durante 2 minutos
```

```
        V1=1;
```

```
    else
```

```
    {
```

```
        V1=0;    //La Válvula 1 se mantiene apagada durante 45 minutos
```

```
        BOMBA = 0;
```

```
    }
```

```
        //Encendido y apagado de Válvula2
```

```
    if (V2_On < 2 && Ons_V2 < 45)    //la Válvula 2 Se mantiene encendida durante 2 minutos
```

```
        V2=1;
```

```
    else
```

```
    {
```

```
        V2=0;    //La Válvula 2 se mantiene apagada durante 45 minutos
```

```
        BOMBA = 0;
```

```
    }
```

```
}
```

```

        //Encendido y apagado de Válvula3
if (V3_On < 3 && Ons_V3 < 60)    //la Válvula 3 Se mantiene encendida durante 3 minutos
    V3=1;
else
{
    V3=0;        //La Válvula 3 se mantiene apagada durante 60 minutos
    BOMBA = 0;
}

//Encendido y apagado de Válvula 4
if (V4_On < 3 && Ons_V4 < 60)    //la Válvula 4 Se mantiene encendida durante 3 minutos
    V4=1;
else
{
    V4=0;        //la Válvula 4 Se mantiene apagada durante 60 minutos
    BOMBA = 0;
}

        //Encendido y apagado de Válvula5
//if (V5_On < 5 && Ons_V5 < 60)    //la Válvula 5 Se mantiene encendida durante 5 minutos
//    V5=1;
//
// else
//
// {
//     V5=0;        //La Válvula 5 se mantiene apagada durante 60 minutos
//     BOMBA = 0;
//
// }

//Encendido y apagado de la Bomba
if ((V1_On >= 2) && (V2_On >= 2) && (V3_On >= 3) && (V4_On >= 3))// && (V5_On >= 5))    //Si el tiempo de
encendido de ambas Válvulas son mayores a los requeridos se apaga la bomba

{
    BOMBA=0;
    V1 = 0;        //Nos aseguramos que las Válvulas se apaguen simultáneamente con la bomba
    V2 = 0;
    V3 = 0;
    V4 = 0;

```

```

        V5 = 0;
    }
    else
    {
        BOMBA=1;          //En caso contrario se mantiene encendida la bomba
    }

//Reinicio de variables
if (V1_On >= 42) //Cada ciclo de la Válvula 1 dura 42 minutos (2 encendido + 45 apagado)
{
    V1_On = 0;
    Ons_V1++;
}

if (V2_On >= 42) //Cada ciclo de la Válvula 2 dura 42 minutos (2 encendido + 45 apagado)
{
    V2_On = 0;
    Ons_V2++;
}

if (V3_On >= 63) //Cada ciclo de la Válvula 3 dura 63 minutos (3 encendido + 60 apagado)
{
    V3_On = 0;
    Ons_V3++;
}

if (V4_On >= 63) //Cada ciclo de la Válvula 4 dura 63 minutos (3 encendido + 60 apagado)
{
    V4_On = 0;
    Ons_V4++;
}

// if (V5_On >= 65) //Cada ciclo de la Válvula 5 dura 65 minutos (5 encendido + 60 apagado)
// {
//     V5_On = 0;
//     Ons_V5++;

```

```

}

if((Ons_V1>=10)&&( Ons_V2>=10)&&(Ons_V3>=7)&&(Ons_V4>=7))&&(Ons_V5>=8))
{
    Ons_V1 = 0;
    Ons_V2 = 0;
    Ons_V3 = 0;
    Ons_V4 = 0;
    //    Ons_V5 = 0;

    BOMBA=0;
    V1 = 0;        //Nos aseguramos que las Válvulas se apaguen simultáneamente con la bomba
    V2 = 0;
    V3 = 0;
    V4 = 0;
    V5 = 0;

    for(j=0;j<=19;j++)
    {
        for(i=0;i<=55;i++)
            delay(930);
    }
}

delay();

//Incremento del contador
V1_On++;
V2_On++;
V3_On++;
V4_On++;
//    V5_On++;

}
}

```

Apéndice C. Diagrama de tiempos riego a tiempos

15 riegos de 1 minuto (975 ml)																														
Inicio	1 min	30 min	1 min	30 min	1 min	30 min	1 min	30 min	1 min	30 min	1 min	30 min	1 min	30 min	1 min	30 min	1 min	30 min	1 min	30 min	1 min	30 min	1 min	30 min	1 min	30 min	1 min	30 min	Fin	
09:00:00 . a.m	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	04:15:00 p.m

12 riegos de 1 minuto (780 ml)																								Fin
Inicio	1 min	40 min	1 min	40 min	1 min	40 min	1 min	40 min	1 min	40 min	1 min	40 min	1 min	40 min	1 min	40 min	1 min	40 min	1 min	40 min	1 min	40 min	1 min	Fin
09:00:00 . a.m	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	04:32:00 . p.m

12 riegos de 3 minuto (2340 ml)																								Fin
Inicio	3 min	40 min	3 min	40 min	3 min	40 min	3 min	40 min	3 min	40 min	3 min	40 min	3 min	40 min	3 min	40 min	3 min	40 min	3 min	40 min	3 min	40 min	3 min	Fin
09:00:00 . a.m	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	04:56:00 . p.m

12 riegos de 2 minuto (1560 ml)																								Fin
Inicio	2 min	40 min	2 min	40 min	2 min	40 min	2 min	40 min	2 min	40 min	2 min	40 min	2 min	40 min	2 min	40 min	2 min	40 min	2 min	40 min	2 min	40 min	2 min	Fin
09:00:00 . a.m	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	04:44:00 . p.m

10 riegos de 2 minuto (1300 ml)																				Fin
Inicio	2 min	40 min	2 min	40 min	2 min	40 min	2 min	40 min	2 min	40 min	2 min	40 min	2 min	40 min	2 min	40 min	2 min	40 min	2 min	Fin
09:00:00 . a.m	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	04:05:00. p.m

6 riegos de 2.5 minuto (975 ml)												Fin
Inicio	2.5 min	60 min	2.5 min	60 min	2.5 min	60 min	2.5 min	60 min	2.5 min	60 min	2.5 min	Fin
09:00:00 . a.m	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	03:15:00. p.m

6 riegos de 2 minuto (780 ml)													
Inicio	2 min	60 min	2 min	60 min	2 min	60 min	2 min	60 min	2 min	60 min	2 min	Fin	
09:00:00 . a.m	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	03:12:00. p.m	

9 riegos de 4 minuto (2340 ml)																		
Inicio	4 min	60 min	4 min	60 min	4 min	60 min	4 min	60 min	4 min	60 min	4 min	60 min	4 min	60 min	4 min	60 min	4 min	Fin
09:00:00 . a.m	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	05:36:00 . p.m

8 riegos de 3 minuto (1560 ml)																
Inicio	3 min	60 min	3 min	60 min	3 min	60 min	3 min	60 min	3 min	60 min	3 min	60 min	3 min	60 min	3 min	Fin
09:00:00 . a.m	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	04:24:00 . p.m

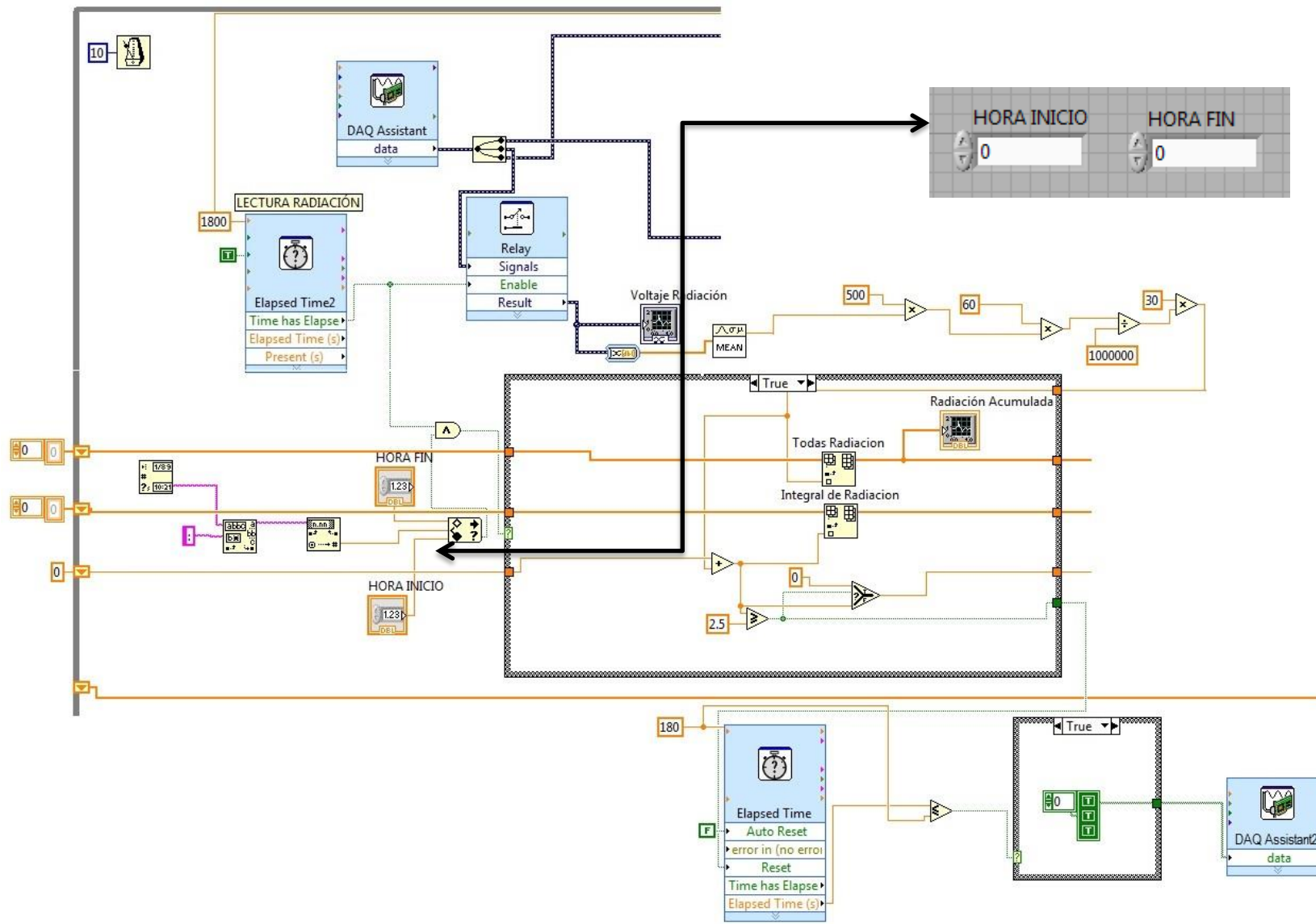
7 riegos de 3 minuto (1365 ml)													
Inicio	3 min	60 min	3 min	60 min	3 min	60 min	3 min	60 min	3 min	60 min	3 min	Fin	
09:00:00 . a.m	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	03:21:00. p.m	

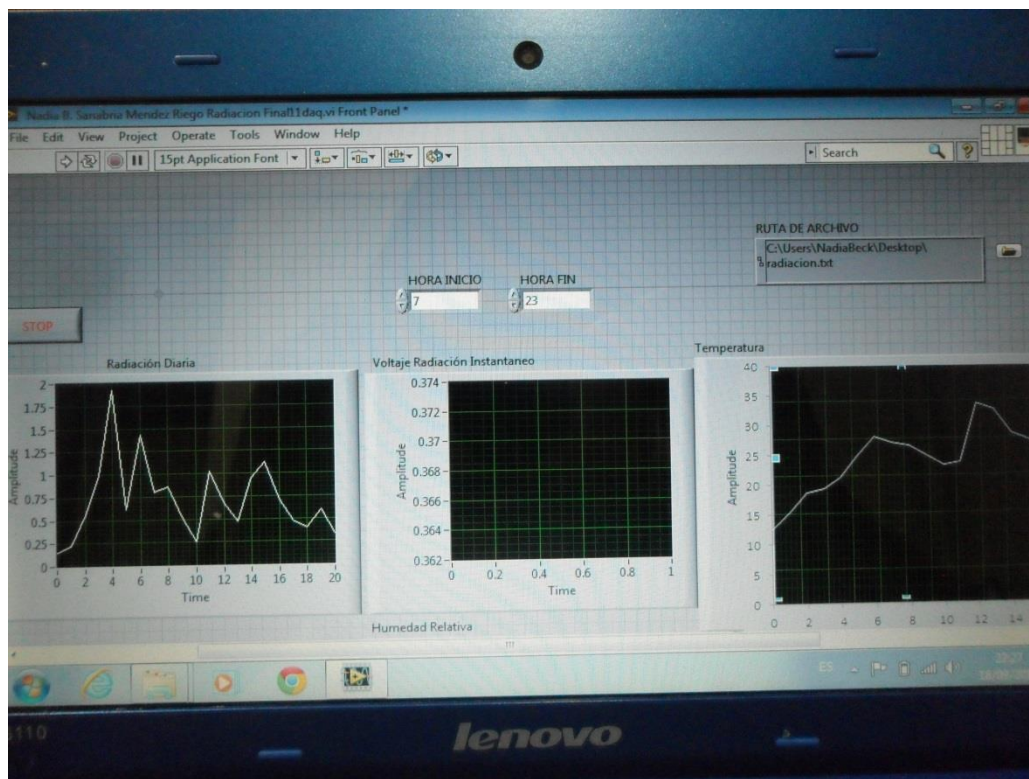
8 riegos de 5 minuto (1466 ml)																
Inicio	5 min	60 min	5 min	60 min	5 min	60 min	5 min	60 min	5 min	60 min	5 min	60 min	5 min	60 min	5 min	Fin
09:00:00 . a.m	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	04:40:00 . p.m

Apéndice D. Cálculo de Radiación PAR acumulada y dotación de riego

- | | |
|---|---|
| <p>1 Volumen total de agua disponible (ats)
 $ats = atd * Vc$
 $ats = 24.55\% * 12 \text{ L} \quad ats = 2.946 \text{ L}$</p> | <p>2 Volumen de gasto por contenedor (Vac)
 $Vac = ac * ats$
 $Vac = 5\% * 2.946 \text{ L} \quad Vac = 0.147 \text{ L} = 147 \text{ ml}$</p> |
| <p>3 Basándose en el consumo propuesto por Salas y Urrestarazu (2004) de 120 ml por 1 MJ m⁻² de radiación global y teniendo en cuenta que según Righini y Grossi (2004) la radiación PAR es aproximadamente el 50% de la radiación global se determina un consumo de agua de 60 ml/planta por cada mol m⁻² de radiación $I_{Cm} = 60 \text{ ml/planta}$</p> | |
| <p>4 Consumo por planta (Cu)
 $Cu = Cm * np \quad Cu = 60 \text{ ml/planta} * 1 \text{ planta}$
 $Cu = 60 \text{ ml}$</p> | <p>5 Radiación PAR acumulada (ra)
 $ra = Vac / Cu \quad ra = 147 \text{ ml} / (60 \text{ ml/mol m}^2)$
 $ra = 2.45 \text{ mol m}^{-2} \approx 2.5 \text{ mol m}^{-2}$</p> |
| <p>6 Dotación de cada riego (V) para drenaje de 10%
 $V = Vac / ((1-d))$
 $V = 147 \text{ ml} (1-0.9) \quad V = 163 \text{ ml planta}^{-1}$</p> | <p>7 Tiempo de riego (tr) para 10 % de drenaje
 $tr = V / c \quad tr = 163 \text{ ml} / (65 \text{ ml/min})$
 $tr = 2.5 \text{ min} \approx 2.0 \text{ min}$</p> |
| <p>8 Dotación de cada riego (V) para drenaje de 20%
 $V = Vac / ((1-d))$
 $V = 147 \text{ ml} (1-0.8) \quad V = 184 \text{ ml planta}^{-1}$</p> | <p>9 Tiempo de riego (tr) para 20 % de drenaje
 $tr = V / c \quad tr = 184 \text{ ml} / (65 \text{ ml/min})$
 $tr = 2.83 \text{ min} \approx 3.0 \text{ min}$</p> |
| <p>10 Dotación de cada riego (V) para drenaje de 30%
 $V = Vac / ((1-d))$
 $V = 147 \text{ ml} (1-0.7) \quad V = 210 \text{ ml planta}^{-1}$</p> | <p>7 Tiempo de riego (tr) para 30 % de drenaje
 $tr = V / c \quad tr = 210 \text{ ml} / (65 \text{ ml/min})$
 $tr = 3.23 \text{ min} \approx 3.0 \text{ min}$</p> |

Apéndice E. Código en LabView de adquisición de radiación y control de riego por integral de radiación PAR





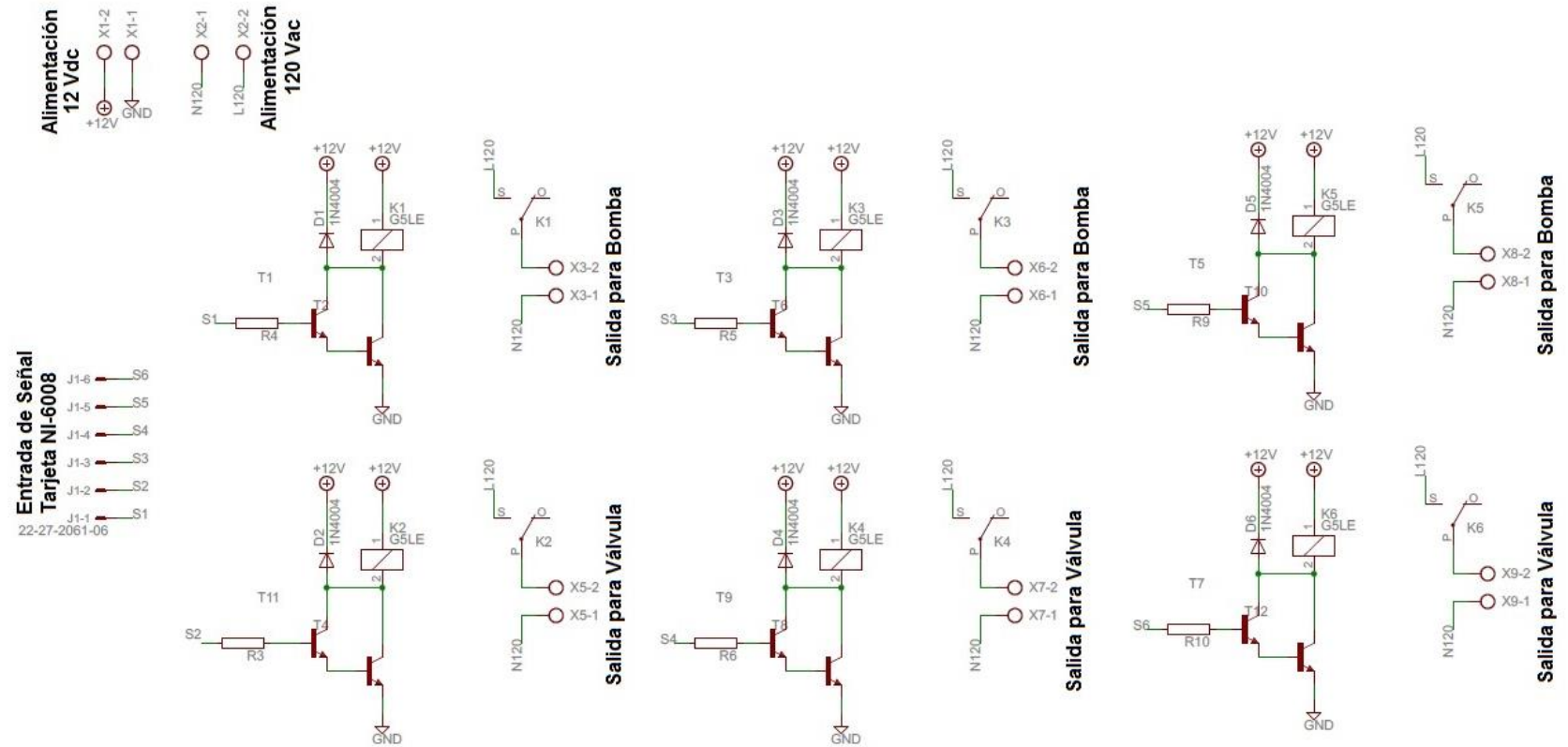
El código de adquisición en Labview, se elaboró para que las lecturas del sensor de radiación se realizaran dentro de un horario establecido por el usuario, por lo cual en el panel frontal se estableció la hora de inicio y final de las lecturas, las lecturas se realizaban de forma automática cada 30 minutos. Los datos eran obtenidos a través de la tarjeta de adquisición NI-6008 configurando el Daq- Assistant para que adquiriera 100 muestras por segundo, una vez obtenidos los datos en voltaje de 0- 4 Voltios se calculaba el promedio, e inmediatamente la lectura era convertida en unidades de radiación PAR (mol m^{-2}). Luego el dato de radiación PAR ingresaba a la estructura (Case Structure) donde se determinaba si había un valor de radiación anterior para sumar la nueva radiación e ir acumulando el valor para luego compararlo contra el umbral establecido de 2.5 mol m^{-2} , si el valor de radiación acumulada era inferior a este

umbral se generaba una señal booleana falsa, de lo contrario se generaba una señal booleana verdadera que daba la orden al Daq- Assistant para que generará las señales digitales que activaban la placa de relevadores. En el panel frontal se graficaba la radiación acumulada cada 30 minutos lo que permite al usuario saber cuántos riegos se habían realizado.

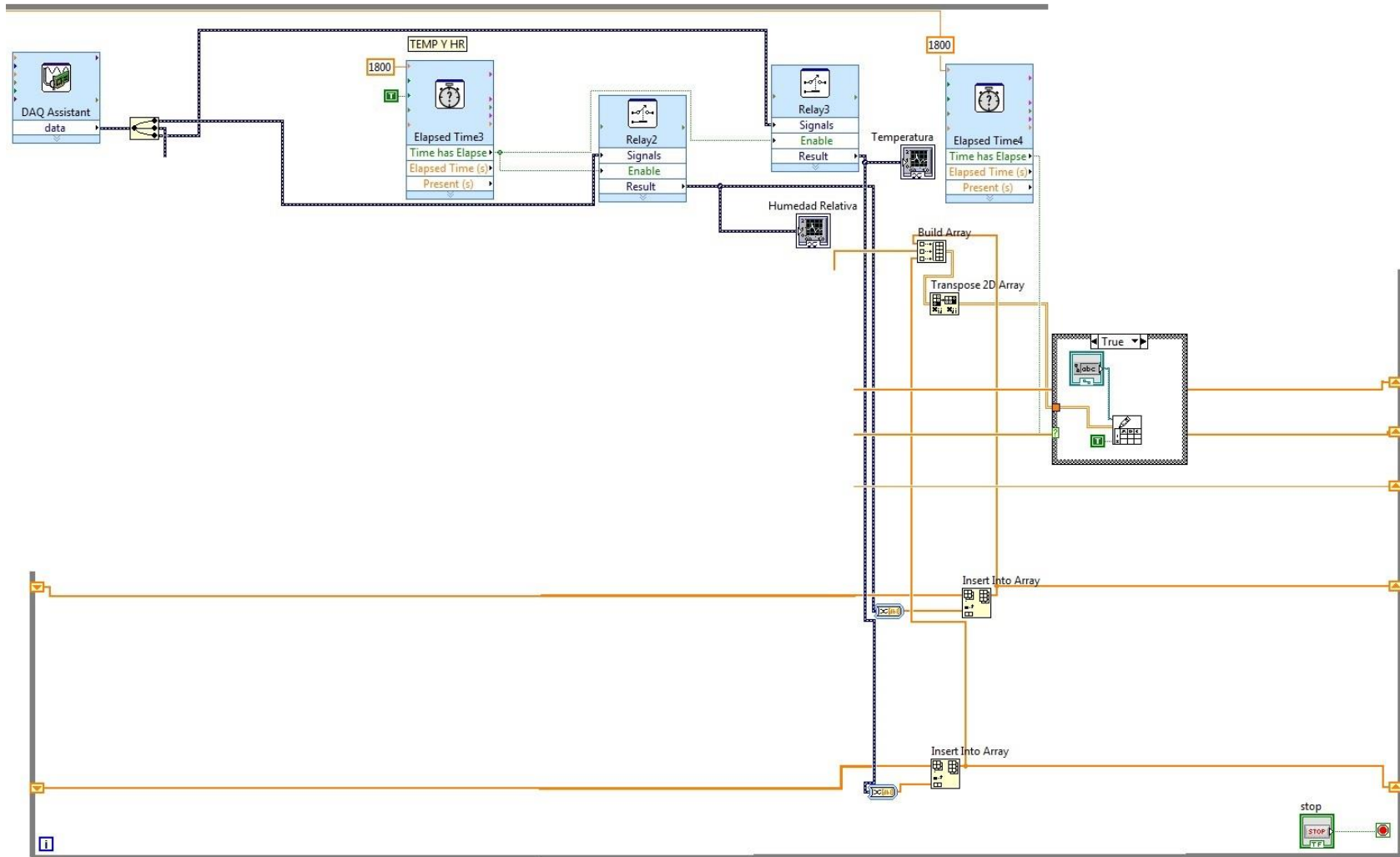
Si se fuese a implementar el sistema de adquisición y control de los riegos por radiación en labView a nivel comercial, no resulta necesario graficar el voltaje de radiación, ya que este dato no es significativo, por el contrario sí es importante graficar la radiación acumulada ya que ésta da una idea del comportamiento de la radiación al interior del invernadero. Adicionalmente se puede medir y adquirir otras variables de importancia para el cultivo como: temperatura, humedad relativa, transpiración, CE del drenaje y de la solución nutritiva, pH del drenaje y de la solución nutritiva. De igual forma se puede programar alarmas que generen señales de alerta cuando las variables medidas se encuentren fuera de los rangos óptimos para el cultivo.

El almacenamiento de datos tanto de radiación como de temperatura se realizó de igual forma cada 30 minutos, en una hoja de Excel, organizando los datos en de cada variable en columnas diferentes.

Apéndice F. Diagrama electrónico placa de relevadores



Apéndice G. Código en LabView de almacenamiento y graficado de lecturas de sensores



Apéndice H. Análisis de varianza experimento 1

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA PORCENTAJE DE DRENAJE 0-60 DDT

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>de Grados libertad</i>	<i>de Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Frecuencia de Riego	1477.87	1	1477.87	34.80	3.87
Conductividad Eléctrica	955.91	1	955.91	22.51	3.87
Interacción	752.91	1	752.91	17.73	3.87
Error	13418.43	316	42.46		
Total	16605.12	319			

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA PORCENTAJE DE DRENAJE DE 60 DDT- FIN DE CICLO

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>de Grados libertad</i>	<i>de Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Frecuencia de Riego	1304.42	1	1304.42	21.11	3.87
Conductividad Eléctrica	2110.99	1	2110.99	34.16	3.87
Interacción	820.35	1	820.35	13.27	3.87
Error	20517.32	332	61.80		
Total	24753.08	335			

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA C.E DEL DRENAJE 0-60 DDT

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma cuadrados</i>	<i>de Grados libertad</i>	<i>de Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Frecuencia de Riego	2.095	1	2.0950	3.054	3.871
Conductividad Eléctrica	20.004	1	20.004	29.158	3.871
Interacción	0.07	1	0.0655	0.095	3.871
Error	216.79	316	0.6861		
Total	238.96	319			

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA C.E DEL DRENAJE DE 60 DDT A FIN DEL CICLO

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma cuadrados</i>	<i>de Grados libertad</i>	<i>de Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Frecuencia de Riego	20.14	1	20.14	31.69	3.87
Conductividad Eléctrica	82.69	1	82.69	130.12	3.87
Interacción	11.04	1	11.04	17.38	3.87
Error	210.97	332	0.635		
Total	324.84	335			

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA NÚMERO DE RAMAS

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>de Grados libertad</i>	<i>de Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Frecuencia de Riego	7.563	1	7.563	0.424	4.001
Conductividad Eléctrica	2.250	1	2.250	0.126	4.001
Interacción	20.250	1	20.250	1.136	4.001
Error	1069.375	60	17.823		
Total	1099.438	63			

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA NÚMERO DE HOJAS

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados libertad</i>	<i>de Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Frecuencia de Riego	13.141	1	13.141	0.001	4.001
Conductividad Eléctrica	2848.891	1	2848.891	0.275	4.001
Interacción	2929.516	1	2929.516	0.282	4.001
Error	622573.438	60	10376.224		
Total	628364.984	63			

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA ALTURA DE LA PLANTA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma cuadrados</i>	<i>de Grados libertad</i>	<i>de Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Frecuencia de Riego	375.39	1	375.391	0.181	4.001
Conductividad Eléctrica	3859.52	1	3859.516	1.865	4.001
Interacción	70.14	1	70.141	0.034	4.001
Error	124199.31	60	2069.989		
Total	128504.36	63			

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA GROSOR DEL TALLO

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma cuadrados</i>	<i>de Grados libertad</i>	<i>de Promedio cuadrados</i>	<i>de los F</i>	<i>Valor para F</i>	<i>crítico</i>
Frecuencia de Riego	3.412	1	3.412	0.812	4.001	
Conductividad Eléctrica	20.329	1	20.329	4.841	4.001	
Interacción	21.064	1	21.064	5.016	4.001	
Error	251.957	60	4.199			
Total	296.762	63				

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA PESO DE FRUTOS TOTALES

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los F cuadrados</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Frecuencia de Riego	45785.071	1	45785.071	6.332
Conductividad Eléctrica	263642.718	1	263642.718	36.461
Interacción	41279.755	1	41279.755	5.709
Error	4078220.598	564	7230.888	3.858
Total	4428928.142	567		

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA PESO DE FRUTOS SANOS

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los F cuadrados</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Frecuencia de Riego	36228.74	1	36228.74	5.28
Conductividad Eléctrica	103040.31	1	103040.31	15.02
Interacción	47691.06	1	47691.06	6.95
Error	2552202.24	372	6860.76	3.87
Total	2739162.34	375		

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA PESO DE FRUTOS VENDIBLES

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Frecuencia de Riego	29004.361	1	29004.361	5.014	3.874
Conductividad Eléctrica	57009.389	1	57009.389	9.855	3.874
Interacción	2201.161	1	2201.161	0.381	3.874
Error	1642862.635	284	5784.728		
Total	1731077.546	287			

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA RENDIMIENTO

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Frecuencia de Riego	95.962	1	95.962	0.411	7.709
Conductividad Eléctrica	197.958	1	197.958	0.848	7.709
Interacción	25.331	1	25.331	0.108	7.709
Error	934.270	4	233.567		
Total	1253.521	7			

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA SÓLIDOS SOLUBLES TOTALES FRUTOS TOTALES

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Frecuencia de Riego	6.447	1	6.447	3.581	3.897
Conductividad Eléctrica	91.571	1	91.571	50.865	3.897
Interacción	6.840	1	6.840	3.799	3.897
Error	302.448	168	1.800		
Total	407.307	171			

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA SÓLIDOS SOLUBLES TOTALES DE FRUTOS SANOS

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Frecuencia de Riego	16.990	1	16.990	9.611	3.920
Conductividad Eléctrica	53.830	1	53.830	30.451	3.920
Interacción	11.954	1	11.954	6.762	3.920
Error	212.132	120	1.768		
Total	294.906	123			

Apéndice I. Análisis de varianza experimento 2

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA C.E DEL DRENAJE

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Método de Riego	8.813	1	8.813	3.682	3.866
Porcentaje de drenaje	74.956	2	37.478	15.658	3.019
Interacción	0.913	2	0.457	0.191	3.019
Error	919.116	384	2.394		
Total	1003.798	389			

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA VOLUMEN DRENADO

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Método de Riego	9920.74	1	9920.74	0.81	3.87
Porcentaje de drenaje	4682815.16	2	2341407.58	190.26	3.02
Interacción	25723.96	2	12861.98	1.05	3.02
Error	4725532.00	384	12306.07		
Total	9443991.86	389			

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA ALTURA DE LA PLANTA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los F cuadrados</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Método de Riego	48.4	1	48.4	0.2
Porcentaje de drenaje	4043.3	2	2021.6	7.4
Interacción	5813.6	2	2906.8	10.6
Error	23051.2	84	274.4	
Total	32956.5	89		

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA GROSOR DE TALLO

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los F cuadrados</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Método de Riego	3.97	1	3.97	1.59
Porcentaje de drenaje	3.19	2	1.60	0.64
Interacción	6.73	2	3.37	1.35
Error	209.22	84	2.49	
Total	223.11	89		

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA NÚMERO DE RAMAS

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los F cuadrados</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Método de Riego	6.94	1	6.94	4.86
Porcentaje de drenaje	242.42	2	121.21	84.85
Interacción	1.09	2	0.54	0.38
Error	120.00	84	1.43	
Total	370.46	89		

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA NÚMERO DE FRUTOS POR RACIMO

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Método de Riego	0.01	1	0.01	0.02	3.95
Porcentaje de drenaje	1.09	2	0.54	0.81	3.11
Interacción	0.56	2	0.28	0.41	3.11
Error	56.40	84	0.67		
Total	58.06	89			

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Método de Riego	0.10	1	0.10	0.25	5.99
Porcentaje de drenaje	0.03	2	0.01	0.03	5.14
Interacción	0.09	2	0.05	0.11	5.14
Error	2.47	6	0.41		
Total	2.69	11			

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA PESO DE FRUTOS

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Método de Riego	3009.847	1	3009.847	1.104	3.852
Porcentaje de drenaje	13435.387	2	6717.693	2.464	3.006
Interacción	16247.457	2	8123.728	2.979	3.006
Error	2323210.252	852	2726.773		
Total	2355902.943	857			

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA TAMAÑO DE FRUTOS

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Método de Riego	164.144	1	164.144	2.361	3.897
Porcentaje de drenaje	2.298	2	1.149	0.017	3.050
Interacción	7.704	2	3.852	0.055	3.050
Error	11681.187	168	69.531		
Total	11855.332	173			

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA RENDIMIENTO

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Método de Riego	0.05	1	0.05	0.26	5.99
Porcentaje de drenaje	1.72	2	0.86	4.13	5.14
Interacción	2.69	2	1.34	6.47	5.14
Error	1.25	6	0.21		
Total	5.70	11			

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA SÓLIDOS SOLUBLES TOTALES

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Método de Riego	1.40	1	1.40	5.03	3.90
Porcentaje de drenaje	6.93	2	3.47	12.46	3.05
Interacción	5.70	2	2.85	10.25	3.05
Error	46.73	168	0.28		
Total	60.76	173			

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LÁMINA DE AGUA APLICADA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Método de Riego	1270215.0	1	1270215.0	9.5	3.9
Porcentaje de drenaje	1247790.8	2	623895.4	4.6	3.0
Interacción	152522.5	2	76261.3	0.6	3.0
Error	31442090.0	234	134367.9		
Total	34112618.3	239			

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA AGUA ABSORBIDA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Método de Riego	971044.82	1	971044.82	10.79	3.88
Porcentaje de drenaje	1255786.30	2	627893.15	6.98	3.03
Interacción	68849.63	2	34424.82	0.38	3.03
Error	21062418.85	234	90010.34		
Total	23358099.60	239			

Apéndice J. Análisis de varianza experimento 3

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA ALTURA DE LA PLANTA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Tratamientos	12.8	1	12.80	0.10	0.75	4.41
Error	2225	18	123.61			
Total	2237.8	19				

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA GROSOR DE TALLO

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Tratamientos	1.62	1	1.62	0.845	0.370	4.414
Error	34.59	18	1.92			
Total	36.22	19				

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA N° DE RAMAS

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Tratamientos	0.2	1	0.20	0.22	0.65	4.41
Error	16.6	18	0.92			
Total	16.8	19				

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA N° DE FRUTOS POR RACIMO

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Tratamientos	0.2	1	0.20	0.72	0.41	4.41
Error	5	18	0.28			
Total	5.2	19				

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA IAF

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Tratamientos	0.018	1	0.018	5.169	0.063	5.987
Error	0.021	6	0.003			
Total	0.039	7				

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA N° DE FRUTOS

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Tratamientos	1892.25	1	1892.25	69.44	0.01	18.51
Error	54.5	2	27.25			
Total	1946.75	3				

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA PESO DE FRUTOS

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Tratamientos	57440.11	1	57440.11	21.45	0.0000045	3.86
Error	1537360.89	574	2678.33			
Total	1594801.00	575				

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA TAMAÑO DE FRUTOS

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Tratamientos	8.36	1	8.36	0.13	0.71	3.94
Error	6224.69	100	62.25			
Total	6233.05	101				

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA AFECTACIÓN POR PUDRICION APICAL

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Tratamientos	1.681	1	1.681	3.432	0.205	18.513
Error	0.980	2	0.490			
Total	2.661	3				

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA RENDIMIENTO

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Tratamientos	1008.68	1	1008.68	36.03	0.0010	5.99
Error	167.97	6	27.996			
Total	1176.65	7				

Apéndice K. Fotografías del trabajo de investigación







