



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**RESPUESTA DEL PIMIENTO MORRÓN AL SECADO
PARCIAL DE LA RAÍZ Y SUSTRATOS EN HIDROPONÍA
E INVERNADERO**

JUAN ANTONIO CHAMÚ BARANDA

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2010

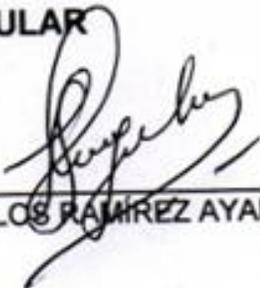
La presente tesis titulada: **RESPUESTA DEL PIMIENTO MORRÓN AL SECADO PARCIAL DE LA RAÍZ Y SUSTRATOS EN HIDROPONÍA E INVERNADERO**, realizada por el alumno: **JUAN ANTONIO CHAMÚ BARANDA**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

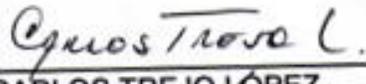
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:


DR. CARLOS RAMIREZ AYALA

ASESOR:


DR. CARLOS TREJO LOPEZ

ASESOR:


DR. ANSELMO LOPEZ ORDAZ

ASESOR:


M.C. ENRIQUE MARTINEZ VILLEGAS

Montecillo, Texcoco, México, Septiembre de 2010

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y Colegio de Postgraduados, que juntos hicieron posible mis estudios de maestría y la realización de la presente investigación.

Al programa de Hidrociencias y Botánica, personal académico y administrativo por el apoyo y facilidades otorgadas durante mi permanencia.

Al Dr. Carlos Ramírez Ayala por su dirección, apoyo y confianza, así como sus valiosas enseñanzas y consejos para el buen desarrollo de la investigación, por ser un pilar fundamental en mi desarrollo profesional, excelente amigo y maestro.

Al Dr. Carlos Trejo López por su confianza, apoyo y persistente guía en la ejecución de la presente investigación, por brindarme sus conocimientos y ser parte esencial en mi formación académica y personal. Mas que nada por su amistad y afecto mostrado durante todo este tiempo.

Al Dr. Anselmo López Ordaz por sus apreciadas aportaciones a la presente investigación, sus comentarios, pero sobre todo por su gran disposición y amistad incomparable demostrada hacía mi.

Al M.C. Enrique Martínez Villegas por sus importantes aportaciones y acertadas sugerencias que contribuyeron a mejorar el presente trabajo de investigación y por su gran amistad brindada.

Al Dr. José Alberto S. Escalante Estrada y M.C. María Teresa Rodríguez González por su excelente calidad humana y ser parte fundamental en mi desarrollo académico y personal. Agradezco su amistad.

A los M.C. Ana Bertha Galicia y Francisco Landeros por su asistencia técnica en el laboratorio de Botánica y Física de suelos.

Al C. Alejandro Hernández Nequis por su amistad brindada, consejos y apoyo incondicional en la realización del trabajo de campo de la presente investigación.

DEDICATORIA

A mis Padres:

*Juan Chamú Mendoza y
Antonia Baranda Mendoza*

A mis Hermanos:

*Leticia, Imelda, Beneranda, Maribel, Pastor,
Selene, Josué y Felipa*

A mi Esposa e Hijo:

Nayeli y Jasiel Antonio

*Gracias por su apoyo, confianza y amor incondicional, siempre los
llevo en mi corazón.*

CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS EN EL TEXTO	ix
ÍNDICE DE FIGURAS EN EL TEXTO	x
ÍNDICE DE CUADROS EN EL APÉNDICE	xviii
RESUMEN	xx
ABSTRACT	xxi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	4
2.1 Objetivo general.....	4
2.1.1 Objetivos específicos.....	4
2.2 Hipótesis general.....	4
2.2.1 Hipótesis específicas.....	4
III. REVISIÓN DE LITERATURA	5
3.1 Uso del agua en el sector agrícola.....	5
3.2 Eficiencia en el uso del agua.....	6
3.2.1 Eficiencia en el uso del agua por las plantas.....	7
3.3 Secado parcial de la raíz (SPR).....	8
3.3.1 SPR en el cultivo del chile.....	11
3.4 Sustancias reguladoras del crecimiento.....	12
3.4.1 Ácido abscísico (ABA).....	14
3.4.1.1 Translocación y redistribución del ABA.....	15
3.4.1.2 Acción del ABA sobre las células guarda.....	16
3.4.1.3 Estimulación del crecimiento de la raíz e Inhibición del crecimiento del brote en bajos potenciales de agua por el ABA.....	18
3.5 Efecto del tamaño del recipiente.....	19
3.6 Sustratos.....	24
3.6.1 Función y criterios para la elección de un sustrato.....	24
3.6.2 Propiedades de los sustratos de cultivo.....	25
3.6.2.1 Propiedades físicas.....	25

3.6.2.1.1	Características del espacio poroso.....	26
3.6.2.1.2	Movimiento del agua dentro de un sustrato.....	27
3.6.2.1.3	Curva de retención de agua.....	29
3.6.2.1.4	Relaciones hídricas sustrato-planta.....	29
3.6.2.2	Propiedades físico-químicas y químicas.....	30
3.6.2.3	Materia orgánica (nutrimentos “asimilables”).....	31
3.7	Factores ambientales.....	33
3.7.1	Temperatura.....	34
3.7.1.1	Rango de temperatura óptima.....	35
3.7.1.2	Temperaturas nocturnas y diurnas.....	35
3.7.2	Humedad relativa (HR).....	36
3.7.3	Luz.....	36
3.7.4	CO ₂	37
3.8	Descripción taxonómica.....	39
3.9	Descripción morfológica.....	40
IV.	MATERIALES Y MÉTODOS	42
4.1	Ubicación.....	42
4.2	Caracterización física de los sustratos.....	42
4.3	Calibración del TDR con ambos sustratos.....	43
4.4	Material vegetal.....	44
4.5	Siembra y establecimiento del experimento.....	45
4.5.1	Obtención de plántula.....	45
4.5.2	Trasplante.....	45
4.6	Tratamientos y diseño experimental.....	46
4.7	Manejo del experimento.....	49
4.7.1	Medición del contenido de humedad y aplicación de los tratamientos de HAR en el sustrato.....	49
4.7.2	Riegos.....	52
4.7.2.1	Riego y fertilización de las plantas en el sustrato de tezontle.....	52
4.7.2.2	Riego y fertilización de las plantas en el sustrato de composta.....	52

4.7.3 Prácticas culturales.....	53
4.8 Factores ambientales.....	54
4.9 Variables a evaluar.....	55
4.9.1 Relaciones hídricas.....	55
4.9.2 Intercambio de gases.....	55
4.9.3 Área foliar, distribución de la materia fresca y seca en hoja, tallo, raíz y fruto.....	56
4.9.4 Calidad del fruto.....	56
4.9.5 Eficiencia en el uso del agua (EUA).....	56
4.10 Análisis estadístico.....	57
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	58
5.1 Caracterización física de los sustratos.....	58
5.2 Calibración de las lecturas del TDR (θ vol).....	62
5.3 Factores ambientales.....	63
5.4 Evapotranspiración.....	65
5.5 Relaciones hídricas (Ψ_{hoja}).....	68
5.6 Intercambio de gases.....	73
5.7 Área foliar ($\text{m}^2 \text{pl}^{-1}$).....	77
5.8 Materia fresca y seca de raíz, tallo, hoja y fruto.....	81
5.8.1 Materia fresca y seca de la raíz.....	81
5.8.2 Materia fresca y seca del tallo.....	87
5.8.3 Materia fresca y seca de la hoja.....	91
5.8.4 Materia fresca y seca del fruto.....	95
5.8.5 Distribución de la materia fresca y seca.....	99
5.9 Materia fresca y seca total.....	104
5.10 Calidad del fruto.....	107
5.10.1 Firmeza (Newton).....	108
5.10.2 Sólidos solubles totales ($^{\circ}\text{Brix}$).....	110
5.11 Eficiencia en el uso del agua (EUA).....	111
5.11.1 EUA obtenida de la materia fresca del fruto.....	111
5.11.2 EUA obtenida de la materia fresca total.....	113

VI. CONCLUSIONES.....	116
VII. RECOMENDACIONES.....	118
VIII. LITERATURA CITADA.....	119
IX. APÉNDICE.....	150

ÍNDICE DE CUADROS EN EL TEXTO

Cuadro	Título	Pág.
3.1	Parámetros físicos y químicos de las lombricompostas (Raviv <i>et al.</i> , 1986).....	32
3.2	Recomendaciones de granulometría para la selección de materiales orgánicos e inorgánicos a usarse en la preparación de sustratos para producción en maceta.....	32
3.3	Temperaturas críticas para pimiento en las distintas fases de desarrollo.....	36
3.4	Clasificación taxonómica del pimiento.....	39
4.1	Factores, niveles y tratamientos en estudio.....	48
4.2	Composición química de la solución nutritiva Steiner (1984).....	53
4.3	Calendario de aplicación de fungicidas e insecticidas y control de malezas en el cultivo de pimiento morrón.....	54
5.1	Caracterización física de ambos sustratos evaluados.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS EN EL TEXTO

Figura	Título	Pág.
3.1	Redistribución del ABA en la hoja resultado de la alcalinización de la savia del xilema durante el estrés hídrico (Taiz y Zeiger, 2002).....	16
3.2	Modelo de acción de ABA en las células guarda de los estomas.....	17
3.3	Bajo condiciones de estrés hídrico, la relación raíz/brote es mucho mayor cuando el ABA está presente (tipo silvestre) que cuando está ausente (mutante) (Saab <i>et al.</i> , 1990).....	18
3.4	Morfología de la planta de pimiento.....	41
4.1	Área de estudio.....	42
4.2	Lecturas del θ_v con el TDR en tres estratos del recipiente para su posterior comparación con el θ_v obtenida a partir de la humedad gravimétrica y la densidad aparente de cada sustrato utilizado.....	43
4.3	Plántulas de pimiento morrón (44 dde) y riego por inmersión.....	45
4.4	Separación del sistema radical y trasplante.....	46
4.5	Distribución de los tratamientos en el área de estudio.....	47
4.6	Tratamientos en estudio.....	48
4.7	Procedimiento en la toma de la lectura del θ_v con el TDR en tres estratos del recipiente para todos los tratamientos evaluados.....	49
4.8	Medición de la cantidad de agua (mL) aplicada al sustrato para llevarlo nuevamente a capacidad de campo (100 % HAR).....	50
4.9	Comportamiento de la humedad aprovechable residual (HAR) de los tratamientos evaluados bajo tezontle y composta, durante el periodo experimental (1-45 días después de iniciados los tratamientos “ddit”)...	51
4.10	Riego y fertilización.....	52
4.11	Síntomas de deficiencias nutrimentales en plantas crecidas en composta.....	53
5.1	Curva de liberación de humedad en ambos sustratos evaluados.....	60
5.2	Distribución de agua y aire en la curva de liberación de humedad. M.S.=materia sólida, CA=capacidad de aireación, AFD=agua fácilmente disponible, AR=agua de reserva, ADD=agua difícilmente disponible y EPT=espacio poroso total.....	61

5.3	Relación entre el contenido volumétrico de humedad (θ vol) calculado por gravimetría y la densidad aparente de cada sustrato (tezontle y composta) y el contenido volumétrico medido con el TDR.....	63
5.4	Factores ambientales incidentes durante el periodo experimental divididos en tres periodos de muestreo: primer (28 de mayo al 12 de junio) segundo (13 al 28 de junio) y tercer (29 de junio al 12 de julio) periodo.....	64
5.5	Volumen evapotranspirado ($L\ pl^{-1}$) en plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], a los 45 días de haber iniciado los tratamientos (ddit). Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$) según la prueba de Tukey.....	66
5.6	Comportamiento del volumen evapotranspirado ($L\ pl^{-1}$) en plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], durante el periodo experimental.....	67
5.7	Comportamiento del potencial hídrico foliar (Ψ_{hoja}) medido en la mañana (7:00 h) (A) y al mediodía (13:00 h) (B) en plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], durante el periodo experimental.....	69

- 5.8 Potencial hídrico foliar (Ψ_{hoja}) promedio medido en la mañana (7:00 h) (A) y al mediodía (13:00 h) (B) en plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes ≥ 80 %; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes ≥ 80 % (lado húmedo) y el otro ≥ 30 % (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 80 % y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 50 %], durante el periodo experimental. Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$) según la prueba de Tukey..... 71
- 5.9 Comportamiento de la conductancia estomática (A), transpiración (B) y asimilación de CO_2 (C) de las plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes ≥ 80 %; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes ≥ 80 % (lado húmedo) y el otro ≥ 30 % (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 80 % y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 50 %], durante el periodo experimental..... 74
- 5.10 Comportamiento de la eficiencia en el uso del agua instantánea (EUA_i) de plantas de pimiento morrón, en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes ≥ 80 %; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes ≥ 80 % (lado húmedo) y el otro ≥ 30 % (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 80 % y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 50 %], durante el periodo experimental..... 75
- 5.11 Área foliar ($\text{m}^2 \text{pl}^{-1}$) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes ≥ 80 %; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes ≥ 80 % (lado húmedo) y el otro ≥ 30 % (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 80 % y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 50 %], a los 45 días de haber iniciado los tratamientos (ddit). Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$) según la prueba de Tukey..... 78

- 5.12 Comportamiento del área foliar ($m^2\ pl^{-1}$) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], durante el periodo experimental..... 79
- 5.13 Comportamiento de la materia fresca (A) y seca (B) de la raíz ($g\ pl^{-1}$) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], durante el periodo experimental 82
- 5.14 Materia fresca (A) y seca (B) de la raíz ($g\ pl^{-1}$) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], a los 45 días de haber iniciado los tratamientos (ddit). Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$) según la prueba de Tukey..... 83
- 5.15 Materia fresca (A) y seca (B) del tallo ($g\ pl^{-1}$) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], a los 45 días de haber iniciado los tratamientos (ddit). Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$) según la prueba de Tukey..... 89

5.16	Comportamiento de la materia fresca (A) y seca (B) del tallo (g pl ⁻¹) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes ≥80 %; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes ≥80 % (lado húmedo) y el otro ≥30 % (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥80 % y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥50 %], durante el periodo experimental.....	90
5.17	Materia fresca (A) y seca (B) de la hoja (g pl ⁻¹) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes ≥80 %; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes ≥80 % (lado húmedo) y el otro ≥30 % (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥80 % y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥50 %], a los 45 días de haber iniciado los tratamientos (ddit). Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$) según la prueba de Tukey.....	92
5.18	Comportamiento de la materia fresca (A) y seca (B) de la hoja (g pl ⁻¹) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes ≥80 %; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes ≥80 % (lado húmedo) y el otro ≥30 % (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥80 % y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥50 %], durante el periodo experimental.....	93
5.19	Comportamiento de la materia fresca (A) y seca (B) del fruto (g pl ⁻¹) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes ≥80 %; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes ≥80 % (lado húmedo) y el otro ≥30 % (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥80 % y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥50 %], durante el periodo experimental.....	96

5.20	Materia fresca (A) y seca (B) del fruto (g pl^{-1}) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], a los 45 días de haber iniciado los tratamientos (ddit). Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$) según la prueba de Tukey.....	97
5.21	Distribución de la materia fresca total de la planta de pimiento morrón entre sus diferentes órganos (raíz, tallo, hoja y fruto) en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], durante el periodo experimental.....	100
5.22	Distribución de la materia seca total de la planta de pimiento morrón entre sus diferentes órganos (raíz, tallo, hoja y fruto) en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], durante el periodo experimental.....	102
5.23	Comportamiento de la materia fresca (A) y seca (B) total (g pl^{-1}) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], durante el periodo experimental.....	105

- 5.24 Materia fresca (A) y seca (B) total (g pl^{-1}) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], a los 45 días de haber iniciado los tratamientos (ddit). Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$) según la prueba de Tukey..... 106
- 5.25 Calidad de los frutos de pimiento morrón en términos de firmeza (Newton) en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], a los 45 días de haber iniciado los tratamientos (ddit). Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$) según la prueba de Tukey..... 108
- 5.26 Calidad de los frutos de pimiento morrón en términos de sólidos solubles totales ($^{\circ}\text{Brix}$) en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], a los 45 días de haber iniciado los tratamientos (ddit). Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$) según la prueba de Tukey..... 110

- 5.27 Eficiencia en el uso del agua (EUA) obtenida de la materia fresca del fruto de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes ≥ 80 %; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes ≥ 80 % (lado húmedo) y el otro ≥ 30 % (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 80 % y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 50 %], a los 45 días de haber iniciado los tratamientos (ddit). Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$) según la prueba de Tukey..... 112
- 5.28 Eficiencia en el uso del agua (EUA) obtenida de la materia fresca total de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes ≥ 80 %; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes ≥ 80 % (lado húmedo) y el otro ≥ 30 % (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 80 % y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 50 %], a los 45 días de haber iniciado los tratamientos (ddit). Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$) según la prueba de Tukey..... 114

ÍNDICE DE CUADROS EN EL APÉNDICE

Cuadro	Título	Pág.
1-A	Factores ambientales obtenidos dentro del invernadero, a partir del 28 de mayo al 13 de julio de 2010.....	150
2-A	Volumen evapotranspirado ($L\ pl^{-1}$) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), durante el periodo experimental.....	158
3-A	Potencial hídrico de la hoja (Ψ_{hoja} ; MPa) de plantas de pimiento morrón medido en la mañana (7:00 h) y al mediodía (12:00 h) en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), durante el periodo experimental.....	158
4-A	Intercambio de gases de las plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), durante el periodo experimental.....	159
5-A	Eficiencia en el uso del agua instantánea de las hojas de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), durante el periodo experimental.....	159
6-A	Área foliar ($m^2\ pl^{-1}$) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), durante el periodo experimental.....	160
7-A	Materia fresca y seca de la raíz ($g\ pl^{-1}$) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), durante el periodo experimental.....	160
8-A	Materia fresca y seca del tallo ($g\ pl^{-1}$) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), durante el periodo experimental.....	161
9-A	Materia fresca y seca de la hoja ($g\ pl^{-1}$) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), durante el periodo experimental.....	161
10-A	Materia fresca y seca del fruto ($g\ pl^{-1}$) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), durante el periodo experimental.....	162

11-A	Materia fresca y seca total (g pl^{-1}) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), durante el periodo experimental.....	162
12-A	Calidad del fruto de plantas de pimiento morrón en términos de firmeza y sólidos solubles totales ($^{\circ}\text{Brix}$) en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), a los 45 días después de haber iniciado los tratamientos (ddit).....	163
13-A	Eficiencia en el uso del agua obtenida de la materia fresca del fruto por planta de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), durante el periodo experimental.....	163
14-A	Eficiencia en el uso del agua obtenida de la materia fresca total por planta de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), durante el periodo experimental.....	164

RESPUESTA DEL PIMIENTO MORRÓN AL SECADO PARCIAL DE LA RAÍZ Y SUSTRATOS EN HIDROPONÍA E INVERNADERO

Juan Antonio Chamú Baranda, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2010

RESUMEN

La sobre explotación de los acuíferos en México requiere estrategias eficientes en la aplicación y ahorro del agua para la sustentabilidad de los cultivos hortícolas. Así, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de dos niveles de humedad aprovechable residual (HAR) y dos sustratos bajo la técnica de secado parcial de la raíz (SPR) en comparación con riego convencional sobre la fisiología, crecimiento, rendimiento, calidad del fruto y eficiencia en el uso del agua en plantas de pimiento morrón Cannon F1. El experimento se estableció del 15 de abril al 12 de julio de 2010 en condiciones de hidroponía e invernadero, en el Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados, México. Los tratamientos se distribuyeron bajo un diseño completamente al azar con arreglo en parcelas divididas con el factor sustrato ubicado en la parcela grande y el factor HAR ubicado en las parcelas chicas, con cuatro repeticiones y fueron: con tezontle ó composta como sustrato: SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambas macetas ≥ 80 %; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de las macetas ≥ 80 % (lado húmedo) y el otro ≥ 30 % (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo "riego convencional" y HAR en el sustrato ≥ 80 % y, testigo (RC50) con el sistema radical completo "riego convencional" y HAR en el sustrato ≥ 50 %. Las plantas crecieron en macetas de volumen homogéneo, con tezontle ó composta. La fertilización en tezontle se realizó a través del sistema de riego por goteo con una solución nutritiva (SN) Steiner (1984) a un potencial osmótico ($\Psi\pi$) de -0.072 MPa y, en composta las plantas se regaron con agua acidulada hasta los 76 ddt (29 de junio) pues contenía los nutrimentos necesarios para el crecimiento de las plantas, después se suministró SN a un $\Psi\pi$ de -0.036 MPa, debido al agotamiento de los nutrimentos. Los resultados obtenidos muestran que las plantas cultivadas en tezontle lograron mayor distribución y actividad de su sistema radical aumentando 41.9 % la cantidad de agua evapotranspirada, situación que indujo un potencial de agua de las hojas (Ψ_{hoja}) y eficiencia en el uso del agua instantánea (EUA_i) mayor en estas plantas, esto se reflejó en 8.6 % mayor rendimiento por planta, además de aumentar la calidad del fruto en 16.6 y 7.9 % en términos de firmeza y °Brix, respectivamente, comparado al obtenido en composta. No obstante, plantas en composta aumentaron 18.1 % la EUA con un ahorro de 24.779 L pl^{-1} de SN durante el periodo experimental. Es probable que el SPR80-30 estimuló el sistema de señales químicas entre la raíz y

el vástago ya que este tratamiento propició el cierre parcial de los estomas, valor similar del Ψ_{hoja} y poco efecto en la asimilación de CO_2 , en relación a los niveles de HAR más altos (SPR80-80 y RC80) reflejándose en el rendimiento y calidad del fruto mejorados con un 40.4 y 43.2 % mayor en la EUA y ahorro en el agua de riego utilizada, respectivamente en relación a su testigo bajo riego convencional "RC80". Los mayores rendimientos se obtuvieron bajo SPR y tezontle; mientras que bajo RC50 y composta ocurrió lo opuesto.

Palabras clave: *Capsicum annuum* L.; relaciones hídricas; intercambio de gases; eficiencia en el uso del agua.

RESPONSE OF SWEET PEPPER TO PARTIAL ROOTZONE DRYING AND SUBSTRATES IN HIDROPONIC AND GREENHOUSE

Juan Antonio Chamú Baranda, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2010

ABSTRACT

The aquifers over exploitation in Mexico require novel and efficient strategies in the application and water savings for the sustainability of horticultural crops. So, the aim of this research was to evaluate the effect of two levels of readily available water (RAW) and two substrates under the technique of partial rootzone drying (PRD) compared with conventional irrigation on the physiology, growth, yield, fruit quality and water use efficiency of sweet pepper plants Cannon F1. The experiment was settled from April 15th to July 12th 2010 under greenhouse and hydroponic conditions, in the Campus Montecillo of the College of Postgraduates, Mexico. The treatments were distributed under a completely random design with divided plots arrangement with the substrate factor in the big plots and RAW factor in the small plots, with four replications and they were: "tezontle" (volcanic rock) or compost like substrate: PRD80-80, with divided root and RAW in the substrate in both pots $\geq 80\%$; PRD80-30, with divided root and RAW in the substrate in one of the pots $\geq 80\%$ (wet side) and the other $\geq 30\%$ (dry side) with alternation cycles of 15 days; Control (CI80) with the whole root system "conventional irrigation" and RAW in the substrate $\geq 80\%$ and, Control (CI50) with the whole root system "conventional irrigation" and RAW in the substrate $\geq 50\%$. Plants were grown in pots of homogeneous volume filled with "tezontle" or compost. The fertilization in "tezontle" was carried out through the drip irrigation system with a Steiner (1984) nutritive solution (NS) with an osmotic potential ($\Psi\pi$) of -0.072 MPa and, in compost the plants were watered with acidulate water until

the 76 ddt (June 29) because it contained enough nutrients for plants growth, later NS was given to an Ψ_{π} of -0.036 MPa due to the exhaustion of the nutrients. The results showed that plants cultivated in “tezontle” had better distribution and activity of their root system, increasing 41.9 % the quantity of evapotranspired water, situation that induced leaf water potential (Ψ_{leaf}) and instantaneous water use efficiency (IWUE) higher in these plants, this was reflected in 8.6 % higher yield for plant, besides increasing the fruit quality in 16.6 and 7.9 % in terms of firmness and °Brix, respectively, compared to the obtained in compost. Nevertheless, the plants in compost increased the water use efficiency (WUE) 18.1 % with a NS savings of 24.779 L pl⁻¹ during the experimental period. It is likely that PRD80-30 stimulated the chemical signals system between the root-shoot which elicited partial closure of stomata, similar values of Ψ_{leaf} and little effect in the CO₂ assimilation in relation to the levels of higher RAW (PRD80-80 and CI80), being reflected in the yield and fruit quality improved with 40.4 y 43.2 % higher WUE and water saving, respectively, in relation to their control with conventional irrigation RC80. The higher yields were obtained under PRD and “tezontle”; while under CI50 and compost occurred the contrary.

Key words: *Capsicum annuum* L.; water relations; gas exchange; water use efficiency.

I.- INTRODUCCIÓN

La agricultura es la actividad humana en donde se consume el porcentaje mayor de agua disponible en el planeta, por lo tanto, la escasez y mala distribución de ésta es un factor que limita la producción de alimentos en el mundo (Postel, 1998), como consecuencia existen grandes áreas terrestres sujetas a períodos de sequía, las cuales podrían aumentar como consecuencia del cambio climático global (Solomon y Cramer, 1993; Petit *et al.*, 1999). En México las prácticas de riego pueden afectar el ambiente debido al consumo de las reservas acuíferas superficiales y subterráneas, como en la zona norte del país y el Valle de México (CNA, 2005). Por lo tanto es fundamental el desarrollo y adopción de prácticas con niveles altos de eficiencia en el uso del agua (Debaeke y Aboudrare, 2004). Lo anterior se fundamentó en el hecho de que el 80 % del agua disponible en la tierra (186.7 millones de m³) es usada para regar tierras agrícolas (Hamdy *et al.*, 2003).

Al hacer un primer análisis de la reacción de las plantas al déficit hídrico, uno de los primeros eventos que se observa es el cierre de los estomas, mecanismo aparentemente simple y destinado sólo a evitar la caída del potencial hídrico, pero que engloba una serie de ajustes fisiológicos y metabólicos colaterales que incluyen, entre otros, la disminución de la fotosíntesis y alteraciones en el transporte y distribución de fotosintatos, hechos que tienen trascendencia significativa en el funcionamiento normal de la planta y en su rendimiento (Hanson y Hitz, 1982; Kaiser, 1987; Bohnert *et al.*, 1995). En condiciones de estrés hídrico, las raíces activan una serie de señales químicas (Davies y Zhang, 1991), como la producción de ácido abscísico (ABA) que regulan el crecimiento e intercambio de gases del vástago y hojas, los cuales son procesos fundamentales para regular la pérdida de agua por transpiración a través de los estomas (Gowing *et al.*, 1990; Zhang y Outlaw, 2001; Davies *et al.*, 2002). En torno a este panorama, se ha encontrado que, mediante cambios en las técnicas de riego, es posible manipular la conductancia estomática y mejorar la eficiencia del uso del agua (Loveys *et al.*, 2000).

A través de varias investigaciones se ha encontrado que, el déficit hídrico regulado (DHR) y el secado parcial de la raíz (SPR), son dos técnicas de riego que

permiten un ahorro significativo de agua. El DHR involucra aplicar menos agua al cultivo que la evapotranspiración (ET). En contraste, el SPR es una técnica de riego que consiste en que aproximadamente la mitad del sistema radical (SR) se riega, mientras que simultáneamente el riego es suspendido en la otra mitad del sistema hasta cierto nivel de abatimiento de agua en el suelo; al siguiente riego, éste se aplica al lado del SR en proceso de secado y así sucesivamente, durante toda la estación de crecimiento del cultivo (Loveys *et al.*, 2000; Stoll *et al.*, 2000; Kang *et al.*, 2001). Con esta técnica se pretende ahorrar hasta 50 % del agua que se aplicaría al tomar como referencia la ET, o el estado del agua en el suelo.

Al optimizar el sistema, el comportamiento estomático, el estado hídrico del vástago y el crecimiento foliar pueden ser regulados reflejando finalmente un incremento significativo en la eficiencia en el uso del agua (EUA) (Davies *et al.*, 2002). Se estima que el SPR podría mantener el rendimiento similar a plantas bien regadas (Loveys *et al.*, 2000). Esto se basa en que, el potencial hídrico de plantas bajo SPR, se equilibre con la parte de la rizósfera que se encuentra en el suelo húmedo (Hsiao, 1990) y, por lo tanto, éste es similar a plantas con riego completo. Ésta técnica de riego (SPR) ha sido utilizada por muchos investigadores en todo el mundo, con resultados positivos en diversos cultivares; por ejemplo, en peral, esta técnica mejoró tanto la EUA como el rendimiento (Kang *et al.*, 2002); en tanto que en durazno, el SPR y riego comercial produjo el mismo rendimiento y calidad de fruto (Goldhamer *et al.*, 2002). Sin embargo, en algunas investigaciones han encontrado que uno de los problemas relacionados con SPR en tomate es el desarrollo de pudrición apical de fruto (Adams y Ho, 1992; Obreza *et al.*, 1996). Estos mismos autores llegaron a la conclusión que este desorden fisiológico se induce probablemente por un lento transporte de calcio y su baja acumulación en la parte distal del fruto (Bangerth, 1979).

Es evidente que, no todos los cultivos responden de manera similar con el uso del secado parcial de la raíz, por tal razón, es necesario validar esta tecnología en una amplia gama de especies, para conocer las respuestas específicas para cada genotipo y ambiente en que se desarrollen. En la presente investigación se evaluó el

efecto de niveles de humedad aprovechable residual (HAR) y dos sustratos bajo secado parcial de la raíz y riego convencional sobre la fisiología, crecimiento, rendimiento, calidad del fruto y eficiencia en el uso del agua en pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.).

II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivo general

Investigar el efecto del sustrato de cultivo y secado parcial de la raíz (SPR) en comparación con el riego convencional, sobre la fisiología, crecimiento, rendimiento y eficiencia en el uso del agua en pimiento morrón en hidroponía e invernadero.

2.1.1 Objetivos específicos

- a) Determinar el efecto de distintos niveles de humedad en un sistema convencional y secado parcial de la raíz en el potencial hídrico foliar.
- b) Determinar el efecto del secado parcial de la raíz y sustrato en la distribución de biomasa en la planta.
- c) Identificar el efecto de los distintos niveles de humedad en la tasa de fotosíntesis, transpiración, conductancia estomática y eficiencia en el uso del agua instantánea en pimiento morrón.
- d) Identificar la respuesta de la planta en dos sustratos de cultivo y a diferentes niveles de humedad en la cantidad y calidad de la producción.
- e) Cuantificar el agua de riego utilizada en cada sustrato y niveles de humedad durante el periodo experimental.

2.2 Hipótesis general

El SPR y sustrato afectan la fisiología y el crecimiento, mantienen el rendimiento, mejoran calidad del fruto y la eficiencia en el uso del agua, sin alterar las relaciones hídricas en las plantas de pimiento morrón.

2.2.1 Hipótesis específicas

- a) Los diferentes sustratos y niveles de secado parcial de la raíz permiten rendimiento y producción de frutos similares.
- b) Los niveles de secado parcial de la raíz mantienen constante el potencial hídrico foliar de las plantas de pimiento morrón.
- c) Los niveles de secado parcial de la raíz influyen en la disminución del área foliar.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Uso del agua en el sector agrícola

México recibe 1,570 km³ de agua por precipitación y pierde el 67.8 % debido a la evapotranspiración y evaporación directa de las masas de agua, lo que establece la oferta de agua a nivel nacional en 473 km³, de los cuales el 86.7 % (410 km³) fluyen por cauces y vasos superficiales y el resto recarga los mantos acuíferos. Sin embargo, estos recursos hídricos se encuentran repartidos de una forma desigual en el territorio mexicano, dando lugar a variaciones significativas de las disponibilidades de agua según regiones. Así tenemos que, en sólo el 20 % del territorio (sureste) se genera el 50 % del escurrimiento superficial, mientras que el norte (30 % del territorio), genera sólo el 4 % de dicho escurrimiento (López y Casanova, 2000).

La superficie para uso agrícola en México es de aproximadamente 20 millones de hectáreas, siendo el 31 % (6.2 millones) de riego y el resto de temporal. La agricultura utiliza la mayor cantidad de agua (Ayers y Westcot, 1987); en 1998 la extracción total fue de 198 km³; de éstos, 79.4 km³ se destinaron a usos consuntivos, principalmente la agricultura (76 %), seguido del uso doméstico, industrial y acuicultura intensiva con un 17, 5 y 2 %, respectivamente.

Tradicionalmente los grandes sistemas de riego han estado constituidos por embalses y canales de gravedad, empleándose en un 92 % como técnica el riego por superficie y en muchos casos se utiliza el riego por inundación sin control, lo que ocasiona desperdicios y baja eficiencia (de 25 a 35 %) en el aprovechamiento (INEGI, 1998). En torno a este panorama, las zonas con mayor tradición en el riego (zonas centro, noroeste y norte) y que han comenzado a sentir los efectos de la escasez del agua, son las que han comenzado a mejorar su eficiencia de riego, mientras que, en aquellas donde el agua es más abundante (zona sur-sureste), esta mejora se ha producido más lentamente.

De los 61.2 km³ de agua extraídos en 1995 para uso agrícola, el 66 % provenía de aguas superficiales y el 27 % de aguas subterráneas; extrayendo las mayores proporciones de las regiones Lerma-Balsas, Noroeste y Norte (INEGI,

1998). Del total de agua extraída para uso agrícola, se estima que sólo el 65.3 % (40 km³) fue aprovechado para este fin, constituyendo los 21.2 km³ restantes, pérdidas en conducciones y evaporación.

La Comisión Nacional del Agua (CNA) (2006) menciona que, para el año 2025 se prevé una incorporación de 490 mil hectáreas de riego que trae consigo un incremento de volumen de agua de 91 mil millones de m³, y si la tendencia en el uso del agua en el sector agrícola continúa como hasta ahora, las prácticas de riego presentes serán aún más insostenibles. Con el objetivo de incrementar la productividad de las superficies bajo riego y reducir el consumo de agua, la política actual de riego en México se enfoca principalmente a: 1) incrementar la eficiencia del riego, mediante el uso de técnicas como la fertirrigación, etc. y, 2) optimizar la operación y mantenimiento de los sistemas de riego (López y Casanova, 2000).

Sin duda, todas las evidencias estadísticas confirman que la agricultura es el sector clave para el manejo del agua, tanto en la actualidad como en las próximas décadas. Las perspectivas para el presente y futuro cercano son claras, el uso eficiente del agua para la producción agrícola requiere la progresiva modernización del manejo del agua para satisfacer los objetivos de la producción de alimentos, el crecimiento económico y el ambiente. Para lograr afrontar este desafío es necesario implementar inversiones en el manejo del agua en la agricultura y más estrategias para mejorar: a) el manejo de la infraestructura de aguas existente, b) el compromiso de los usuarios del agua y, c) el uso de prácticas agrícolas innovadoras (FAO, 2003).

3.2 Eficiencia en el uso del agua

El aumento de la eficiencia en el uso del agua en la producción de los cultivos es urgente (Hamdy *et al.*, 2003), debido a que el nivel de consumo por la agricultura (80 %) no es sustentable. Aunado a ello, el crecimiento proyectado de la población (otras 2 mil millones de personas dentro de 2-3 décadas) requiere que una mayor cantidad de agua disponible sea usado para las necesidades domésticas, industriales, y ambientales. La solución más realista al aumento de la demanda del agua es la reasignación a estos otros propósitos de un poco del agua usada por la

agricultura. Incluso una modesta reasignación, reduciendo la porción de agua para la agricultura a 70 %, aumentaría la cantidad de agua disponible para otros propósitos hasta un 50 % (Hamdy *et al.*, 2003). Además, con el aumento de la población también es necesario aumentar la producción de alimentos para cubrir el aumento en sus demandas. Esto requiere mejorar la productividad del uso del agua para la agricultura (Wang *et al.*, 2002).

3.2.1 Eficiencia en el uso del agua por las plantas

El desarrollo de mecanismos por las plantas que les permiten controlar la pérdida de agua mientras continúan fijando carbono en la fotosíntesis se considera como un factor esencial para su supervivencia en el medio terrestre (Jones, 2004). Así, la apertura estomática que propicia la entrada de CO₂ a la planta, necesario para la fotosíntesis resulta en una pérdida inevitable de agua. La eficiencia en el uso del agua (EUA) es un parámetro útil que relaciona los dos flujos y muestra el total de CO₂ fijado (beneficio) por unidad de agua perdida (costo).

A nivel de hoja, la eficiencia en el uso del agua instantánea (EUA_i) puede ser estimada con mediciones del intercambio de gases y calculada como la proporción de la asimilación de carbono (A), respecto a la transpiración (E) o A/E, una cantidad relacionada es el cociente de transpiración, el cual es el recíproco de la eficiencia en el uso del agua y representa la pérdida de agua por CO₂ fijado o E/A (Nobel, 1999). A nivel de planta completa, la eficiencia del uso del agua a largo plazo (EUA_{lp}, g materia seca kg⁻¹ H₂O o mmol C mol⁻¹ H₂O) es definida como el cociente de la ganancia neta de materia seca en un periodo de tiempo dado entre el agua perdida durante el mismo tiempo. En agricultura usualmente se utiliza una definición diferente de EUA_{lp} conocida como eficiencia en el uso del agua del cultivo, la cual es una medida del rendimiento económico producido por el agua perdida en la transpiración o evapotranspiración (Chaves *et al.*, 2004). Las definiciones anteriores mencionan una relación estrecha entre la transpiración y la fijación de carbono, y ésta relación puede ser sujeta a manipulación a través de cambios en la fisiología de la planta, resultantes de alteraciones en la conductancia estomática o fijación de carbono.

3.3 Secado parcial de la raíz (SPR)

El secado parcial de la raíz (SPR) es una técnica de riego innovadora que se basa en dos fundamentos fisiológicos: a) las plantas con un buen régimen de riego mantienen sus estomas abiertos, en los que una pequeña reducción de su apertura disminuye sustancialmente la pérdida de agua con un pequeño o nulo efecto en la tasa de fotosíntesis (Jones, 1992) y b) cuando una parte del sistema radical es expuesto al suelo seco, la planta responde enviando señales inhibitoras desde la raíz hacia las hojas para cerrar los estomas y reducir la pérdida de agua (Davies y Zhang, 1991).

Aparentemente se podría pensar que el SPR no tiene nada nuevo puesto que en condiciones naturales todas las raíces de una planta no se secan al mismo tiempo. Sin embargo, además del proceso fisiológico más importante que ocurre en el SPR que es la producción de señales químicas (Stoll *et al.*, 2000); este tipo de riego induce la emisión de raíces secundarias y por consiguiente disminuye la sensibilidad de la raíz a la sequía (Zhang y Tardieu, 1996). Un sistema radical uniformemente distribuido en el suelo como resultado de la alternancia seco y húmedo puede ayudar a un mejor uso de nutrientes y agua del suelo en toda la zona radical (Kang *et al.*, 1998). Al respecto, en experimentos con tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) Mingo *et al.* (2004), han encontrado que el SPR influye en el desarrollo de la raíz, causando un aumento en la biomasa de la raíz del 55 % en comparación con el testigo. Similarmente, en experimentos en campo con plantas de vid variedad Riesling se ha encontrado que el SPR causa un aumento en el desarrollo de las raíces en capas de suelo más profundas (Loveys *et al.*, 2004). A profundidades de 0.4 a 0.7 m, las raíces fueron más abundantes en las plantas con SPR ($P \leq 0.05$), pero significativamente menores en la zona de los 0 a 0.4 m. Esta tendencia a producir más raíces en las capas profundas de suelo puede influenciar la eficiencia en el uso del agua de riego debido a la exploración de agua más accesible en zonas profundas del suelo.

Loveys *et al.* (1997) después de varias investigaciones, concluyeron que para la implementación de la técnica de SPR es necesario que el sistema de riego permita

una alternancia en un periodo de 14 d, de zonas húmeda y seca en diferentes zonas del sistema radical, independientemente del sistema de riego a emplear. Esta alternancia es esencial para mantener continua la emisión de señales de la raíz al follaje, ya que la raíz no es capaz de mantener su producción de ácido abscísico (ABA) por largos períodos de tiempo. La frecuencia de la alternancia está determinada por el tipo de cultivo, suelo y factores ambientales. Al respecto, Kriedemann y Goodwin (2004) sostienen que en el SPR es más importante tomar en cuenta el factor suelo que el ambiente. La textura y estructura del suelo influyen en la infiltración y los elevados niveles de sales, cuyo efecto se conoce que es mayor cuando hay estrés hídrico. A diferencia de los métodos convencionales de riego por déficit hídrico en los que los riegos dependen principalmente de la evapotranspiración (ET), en el SPR se debe tener más énfasis en mediciones directas del contenido de agua en la zona radical. La frecuencia de riegos en el SPR varía de acuerdo a las condiciones ambientales, pero los volúmenes de riego dependen del tipo de suelo y profundidad radical, sin tener variaciones por condiciones ambientales.

La mayoría de autores coinciden y señalan que el SPR es una técnica que tiene mucho potencial y cada vez se está haciendo más evidente que mediante esta técnica se usa menos agua que con el riego convencional (Kang y Zhang, 2004). Al respecto, en experimentos realizados en vid y otros frutales se ha demostrado que el SPR tiene un efecto neutro en el rendimiento, pero puede mejorar la calidad, con una reducción de más del 50 % del consumo de agua (Loveys *et al.*, 1998). Zegbe *et al.* (2006) al evaluar la respuesta del tomate al riego parcial de la raíz (RPR) mediante el estudio de dos factores (tipo y forma de riego), observaron en forma general que, con el uso del RPR el rendimiento no se vio afectado, es decir, fue similar al obtenido con el riego completo de la raíz (RCR), pero además, incrementó la eficiencia en el uso del agua en 73 %, comparado con el RCR. Estos mismos autores concluyeron que el SPR puede ser una alternativa factible en el ahorro de agua para la producción de tomate y para ambientes agroecológicos con restricción de agua para riego. En otra investigación realizada por estos mismos autores, señalaron que la aplicación del SPR no alteró la fisiología de los árboles de manzano “Pacific Rosetm”, ni el

rendimiento, pero tendió a mejorar la calidad de la fruta e incrementó 133 % la eficiencia en el uso del agua. Además, con el uso del SPR se tuvo un 50 % en ahorro de agua para riego, y concluyeron que este sistema de riego puede ser sugerido para zonas húmedas (Zegbe *et al.*, 2007).

Un aspecto que debe resaltarse, que últimamente se ha observado en Chile (*Capsicum* sp.) (Dorji *et al.*, 2005) y en tomate (Zegbe *et al.*, 2006), es que el potencial hídrico en las hojas (Ψ_{hoja}) en las plantas bajo SPR tiende a disminuir en relación con el Ψ_{hoja} de las plantas con riego completo de la raíz. Este fenómeno puede ser debido a dos tipos de demanda hídrica: una, asociada con la elongación del fruto, y otra, debido a la atmósfera [déficit de presión de vapor (DPV)]. Al respecto surge una interrogante: ¿Cómo al regar sólo una parte del sistema radical es suficiente para satisfacer ambas demandas hídricas?, Green y Clothier (1999), al respecto, señalan que en árboles de manzano sometidos a SPR a la intemperie, el sistema radical cambia el patrón de absorción de agua en dos sentidos; a) las raíces sometidas al secado parcial del suelo mejoran la absorción del agua cuando éstas se riegan y b) la absorción del agua se incrementa en casi lo doble que una planta cuyo sistema radical completo se ha regado bien. Ambos mecanismos no se han establecido en Chile, pero podrían estar involucrados de manera similar. Además, la tendencia a disminuir el Ψ_{hoja} podría explicarse, en parte, debido a la radiación solar. Días nublados enmascaran episodios deficitarios de agua en las plantas (Behboudian *et al.*, 1994), mientras que lo opuesto ocurre en días despejados.

Otro beneficio del secado parcial de la raíz reportado en vid y tomate, es el control del vigor vegetativo (Loveys *et al.*, 2000; Davies *et al.*, 2000). Cuando las plantas son expuestas a condiciones de sequía edáfica, el crecimiento foliar puede ser regulado por señales químicas generadas en la raíz independientemente del estado hídrico del vástago, dichas señales químicas producidas en las raíces bajo sequía son conducidas hacia el xilema y transportadas mediante el flujo transpiratorio hacia los sitios de acción de crecimiento foliar (Sobeih *et al.*, 2004). En el cultivo de vid, la reducción en la densidad de la cubierta origina una mejor penetración de la luz

a la zona de racimos con una consecuente mejora en la calidad de la uva (Davies *et al.*, 2002).

Con el objetivo de conocer la respuesta del SPR en comparación con riego convencional sobre el cultivo de tomate en condiciones controladas, Campos *et al.* (2009), encontró que el secado parcial de la raíz generó una disminución en la conductancia estomática y en la transpiración, originando un aumento en la eficiencia en el uso del agua instantánea de las plantas, lo que significa una mejora en la tasa de asimilación de CO₂ por unidad de agua transpirada. Además, los cambios en la fisiología y crecimiento del vástago, resultado de los cambios en los niveles de humedad aprovechable residual, permitieron reducir la cantidad y frecuencia de los riegos en las plantas con SPR, generando así un ahorro en el agua de riego utilizada hasta del 46 %. El rendimiento no varió entre los tratamientos; en cuanto a la calidad de los frutos, no se observaron diferencias en el contenido de sólidos solubles, mientras que su firmeza aumentó un 31 % en las plantas con SPR. Este mismo autor observó que los cambios y disminución en el contenido de agua del sustrato aumentan la concentración de calcio, magnesio, sodio y boro en el follaje, mientras que la concentración de cobre se reduce al menos en alguna condición de SPR; la extracción de los nutrimentos como el nitrógeno, fósforo, potasio y hierro también se reducen con los cambios y disminución en el contenido de agua en el sustrato.

3.3.1 SPR en el cultivo del chile

El cultivo del chile es altamente sensitivo al déficit hídrico (Delfine *et al.*, 2002; De Pascale *et al.*, 2003), en particular durante el cuajado de frutos (Katerji *et al.*, 1993). La técnica del riego parcial de la raíz, como alternativa de riego podría promover el ahorro de agua y mitigar daños por *Phytophthora* en este cultivo (Dorji *et al.*, 2005).

Se ha establecido que en función de las condiciones ambientales, el cultivo de chile requiere un volumen de agua de 5560 m³ ha⁻¹ de riego por goteo para obtener un rendimiento comercial (Khah *et al.*, 2007). Varios autores han reportado que la aplicación de un volumen menor al requerido por la planta reduce el rendimiento de

fruta (Katerji *et al.*, 1993; Dorji *et al.*, 2005) e induce frutos de menor calidad (Khah *et al.*, 2007). Sin embargo, Serna *et al.* (2008), al evaluar el secado parcial de la raíz sobre la producción sustentable de chile seco cv. Mirasol bajo diferentes sistemas de manejo, concluyeron que, el riego parcial de la raíz redujo el rendimiento y la proporción de frutos manchados, pero incrementó 4.3 % la proporción de frutos de mayor valor comercial. Además, con el uso combinado de la incorporación de abonos verdes al suelo y el riego parcial permiten lograr rendimientos de frutos de mayor calidad y reducir en 25 % el volumen de agua de riego aplicado.

Por todo lo anterior, se infiere que el secado parcial de la raíz mejora la eficiencia en el uso del agua de las plantas cultivadas como resultado de sus efectos en la cubierta foliar y la conductancia estomática, con efectos pequeños en la producción y con la posibilidad de aumentar la calidad de los frutos cosechados. Estos beneficios han estimulado un aumento en la consideración de dicha tecnología en la viticultura mundial, así como en varias regiones que cultivan cereales en China y en la zona Este del Mediterráneo, en el cultivo de algodón en Turquía y Australia, así como en el cultivo de Citrus y otros árboles frutales en la región Mediterránea (Bacon, 2004). Por lo tanto, la eficiencia en el uso del agua de otras plantas cultivadas puede verse beneficiadas de este tipo de riego, originando así la posibilidad de aumentar la producción de plantas de calidad en aquellos ambientes que están limitados en el abastecimiento de agua (Campos *et al.*, 2009).

3.4 Sustancias reguladoras del crecimiento

Las plantas continuamente se encuentran sometidas a situaciones ambientales cambiantes, lo que trae como consecuencia una serie de estímulos estresantes, que van a influenciar el desarrollo y crecimiento normal de las plantas (Bohnert y Jensen, 1996). Si bien existen diferentes tipos de estrés ambiental según el estímulo, una buena parte de los mismos está relacionada con el estado hídrico de la planta (Bohnert *et al.*, 1995). Tanto el déficit hídrico como las bajas temperaturas y la salinidad conducen a la deshidratación celular (Morgan, 1984).

Las raíces reconocen cambios pequeños de humedad en el suelo, los que activan una serie de señales que son transportadas a través del sistema vascular y por algún mecanismo, aún desconocido, regulan las reacciones fisiológicas de la planta mucho antes de que el contenido de agua de sus tejidos se vea afectado (Davies y Zhang, 1991). Las reacciones fisiológicas de las raíces a la disponibilidad limitada de agua en el suelo y los factores metabólicos que controlan su supervivencia en esas condiciones se conocen parcialmente, debido principalmente a la dificultad para acceder experimentalmente a ellas (Huang y Gao, 2000; Tuberosa *et al.*, 2002).

Las plantas responden al estrés exhibiendo una variedad amplia de respuestas como: a) el cierre estomático; no obstante, este mecanismo, aparentemente simple y destinado sólo a evitar la caída del potencial hídrico, engloba una serie de ajustes fisiológicos y metabólicos colaterales que incluyen, entre otros, la disminución de la fotosíntesis y alteraciones en la translocación y distribución de fotoasimilados, hechos que tienen trascendencia significativa en el funcionamiento normal de la planta (Hanson y Hitz, 1982; Kaiser, 1987; Prado *et al.*, 1995), b) cambios a nivel del patrón de desarrollo, como la producción de un sistema radical profundo que le permite absorber agua de las capas más profundas del suelo. Al respecto, Sharp *et al.* (1988) en un estudio realizado en condiciones de laboratorio demostraron que las raíces de maíz continúan creciendo en potenciales de agua (Ψ_A) del sustrato hasta de -1.6 MPa, mientras que el crecimiento del vástago se inhibe completamente a partir de $\Psi_A = -0.8$ MPa. Estos mismos autores mencionan que con el mantenimiento del crecimiento radical, se asegura que el agua continúe transportándose al vástago, pues las raíces podrían alcanzar capas más profundas del suelo, con mayor disponibilidad de agua y, c) cambios bioquímicos a través de la expresión y acumulación de diversas sustancias de respuesta que actúan estimulando o inhibiendo ciertas reacciones químicas de algunas rutas metabólicas que promueven una respuesta fisiológica por parte de la planta. Si bien el cierre estomático obedece a un déficit hídrico, no se conoce con exactitud el mecanismo que causa dicha respuesta, aunque en diversas plantas ya se ha demostrado que en este proceso están involucrados dos sistemas de señales: uno mediado por la

hormona ácido abscísico (ABA) y otro que actuaría a nivel genético (Baker *et al.*, 1994; Bohnert *et al.*, 1994).

3.4.1 Ácido abscísico (ABA)

El ABA es considerado como el mediador por excelencia de la respuesta de las plantas al déficit hídrico, aunque no todas las especies vegetales muestran el mismo comportamiento. En plantas superiores, esta fitohormona está involucrada en el control de varios procesos fisiológicos para la adaptación de la misma a distintos tipos de estrés ambiental. En condiciones de estrés hídrico y salino, el ABA permite mantener el balance hídrico en la planta a través de la regulación del grado de apertura de los estomas.

La concentración del ABA puede fluctuar dramáticamente en los tejidos específicos durante el desarrollo o en respuesta a las condiciones ambientales cambiantes. La concentración del ABA en el citosol aumenta durante el estrés hídrico como resultado de su síntesis en la hoja, la redistribución en las células del mesófilo y su importación desde las raíces, así, bajo estas condiciones, el ABA en las hojas puede aumentar hasta 50 veces dentro de 4 a 8 horas (el cambio más dramático en la concentración reportada para cualquier hormona en respuesta a una señal ambiental). Al rehidratarse los tejidos, el ABA disminuye a los niveles normales en la misma cantidad de tiempo. La disminución del ABA luego de la rehidratación de los tejidos es consecuencia de su degradación y exportación, así como también de la disminución de la velocidad de síntesis en la hoja y raíces. La inactivación del ABA puede darse por dos procesos diferentes: 1) Oxidación del ABA: dando un intermedio hidroxilABA inestable, que luego se convierte a ácido faseico (AF) y finalmente a ácido dihidrofaseico (ADF). El AF posee una actividad similar a la del ABA, pero ADF es completamente inactivo y, 2) Conjugación covalente del ABA con monosacáridos: por ejemplo la glucosa para dar ABA-glucosil éster. La conjugación no sólo lleva a la inactivación de la hormona, también altera su distribución celular.

3.4.1.1 Translocación y redistribución del ABA

El ABA se transporta por el xilema y el floema, pero normalmente es mucho más abundante en la savia del floema. Cuando el ABA es aplicado a una hoja, se transporta de forma ascendente en el tallo y descendientemente hacia las raíces, llegando en su mayoría dentro de 24 horas.

El ABA sintetizado en las raíces también puede transportarse a los brotes vía el xilema. La magnitud del estrés induce cambios en la concentración de ABA en el xilema variando ampliamente entre especies. En un estudio realizado, Schurr *et al.* (1992) encontraron una concentración de ABA en la savia del xilema de plantas de girasol bien regadas entre 1.0 y 15.0 nM, mientras que en condiciones de estrés hídrico la concentración de ABA aumentó tanto como 3000 nM (3.0 μ M).

En condiciones de estrés hídrico el ABA es inicialmente sintetizado en las raíces que están en contacto directo con el suelo seco, y luego es transportado a la parte aérea por la corriente transpiratoria vía xilema. Debido a que este transporte puede ocurrir antes de la disminución del potencial de agua del suelo causado por cualquier cambio medible en el estado de agua de las hojas, el ABA es aparentemente una señal de la raíz que ayuda a reducir la tasa de transpiración cerrando el estoma en las hojas (Davies y Zhang, 1991).

Aunque una concentración de 3.0 μ M de ABA en el apoplasto es suficiente para el cierre del estoma, no todo el ABA en el torrente del xilema alcanza las células guarda. Mucho del ABA en el torrente de transpiración al alcanzar las células del mesófilo es metabolizado. Al principio del estrés el pH del flujo xilemático aumenta de 6.3 a 7.2 (Wilkinson y Davies, 1997) y esta alcalinización del apoplasto favorece la formación de la forma disociada del ABA (ABA^-), la cual no puede atravesar las membranas lo que provoca una disminución de ABA que se dirige a las células del mesófilo, dirigiéndose en mayor cantidad al apoplasto y el exterior de las células guarda vía el torrente de transpiración (Figura 3.1). Por lo tanto, lo que ocurre es una redistribución del ABA y no un aumento del mismo, y el aumento de pH funciona

como una señal de la raíz que promueve un cierre temprano de los estomas y como consecuencia una menor pérdida de agua por la planta.

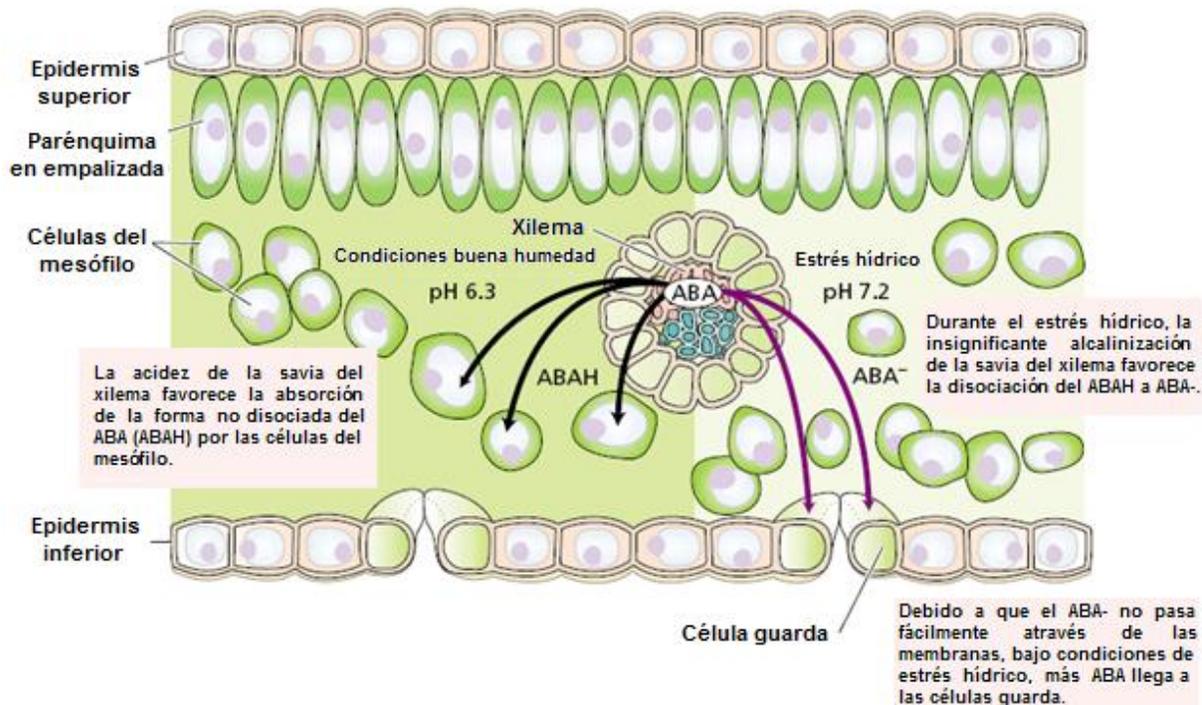


Figura 3.1. Redistribución del ABA en la hoja resultado de la alcalinización de la savia del xilema durante el estrés hídrico (Taiz y Zeiger, 2002)

3.4.1.2 Acción del ABA sobre las células guarda

En la Figura 3.2, se observan los cambios detectados luego de la exposición de las células guarda a la acción del ABA.

- 1) Este modelo sugiere que el ABA se enlaza en un receptor (aún no caracterizado), situado en la membrana plasmática e inicia una ruta de transducción de la señal.
- 2) El ABA causa la apertura de canales de entrada de Ca^{2+} y una despolarización transitoria de la membrana.
- 3) Esta despolarización transitoria promueve la apertura de canales de Cl^- lo cual despolariza aún más la membrana.
- 4) El ABA también aumenta los niveles de IP_3 (inositol 1, 4, 5-trifosfato).

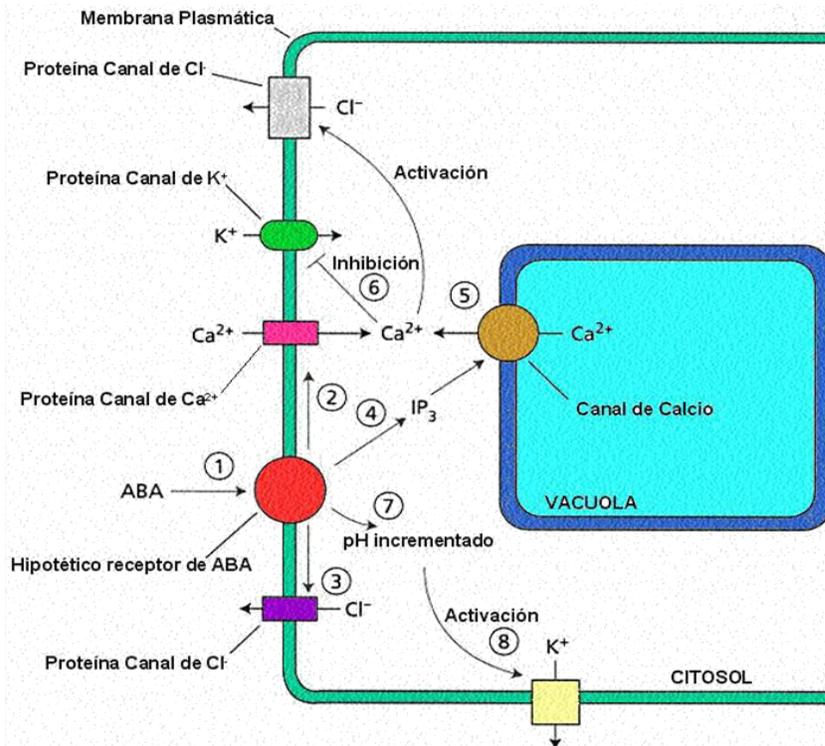


Figura 3.2. Modelo de acción de ABA en las células guarda de los estomas

- 5) El IP_3 induce la apertura de canales de Ca^{2+} y libera más Ca^{2+} de reservorios internos de la célula como las vacuolas. La combinación de la entrada de Ca^{2+} a la célula y la salida de Ca^{2+} de los reservorios internos lleva a un aumento en la concentración de Ca^{2+} citosólica desde 50 a 350 nM a $1.1 \mu M$.
- 6) El incremento total del Ca^{2+} citosólica, activa la apertura de más canales de salida de Cl^- y de malato²⁻ e inhibe la entrada de K^+ . Sin embargo, la activación de estos canales por si solos, no provoca pérdida de K^+ debido a que el potencial de membrana favorece la acumulación del mismo. Para que haya salida de K^+ , el ABA debe inducir una despolarización de membrana larga y sostenida, y se ha demostrado que esto ocurre.
- 7) El ABA provoca un aumento del pH citosólico.
- 8) El aumento en la concentración de Ca^{2+} citosólica y la alcalinización del citosol (donde el pH sube de 7.67 a 7.94) activa los canales de salida de K^+ . El K^+ junto con iones Cl^- y malato²⁻ salen de la célula y como consecuencia la presión de turgencia de las células guarda disminuye, y los estomas se cierran.

3.4.1.3 Estimulación del crecimiento de la raíz e Inhibición del crecimiento del brote en bajos potenciales de agua por el ABA

El ABA tiene diferentes efectos en el crecimiento de raíces y brotes, y los efectos son fuertemente dependientes sobre el estado de agua de la planta. Al respecto, Saab *et al.* (1990) al comparar el crecimiento de brotes y raíces de plántulas de maíz crecidas en Ψ_A altos ($\Psi_A = -0.03$ MPa, condición de abundante agua) o en Ψ_A bajos ($\Psi_A = -0.3$ y -1.6 MPa, en brote y raíz, respectivamente; condiciones de sequía), usando: (1) plántulas del tipo silvestre con niveles normales de ABA y (2) un mutante deficiente de ABA, concluyeron que bajo condiciones de estrés hídrico, cuando los niveles de ABA son altos, ésta hormona ejerce un fuerte efecto positivo en el crecimiento de la raíz suprimiendo la producción del etileno, y un ligero efecto negativo en el crecimiento del brote. El efecto global fue un aumento dramático en la relación raíz/brote en los potenciales de agua bajos (Figura 3.3), qué, en combinación con el efecto de ABA sobre el cierre estomático, ayuda a la planta a arreglárselas con el estrés hídrico.

En maíz y tomate, sin embargo, el menor crecimiento del brote de plantas deficientes de ABA en potenciales de agua altos parece ser debido a la superproducción de etileno que normalmente se inhibe por el ABA (Sharp *et al.*, 2000). Este hallazgo sugiere que el ABA promueve el crecimiento del brote en plantas bien regadas suprimiendo la producción del etileno. Mientras que bajo condiciones de estrés hídrico el ABA promueve el crecimiento de la raíz, al parecer inhibiendo la producción del etileno (Spollen *et al.*, 2000).

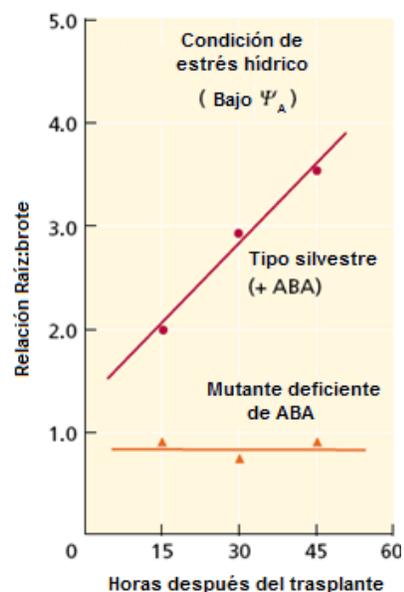


Figura 3.3. Bajo condiciones de estrés hídrico, la relación raíz/brote es mucho mayor cuando el ABA está presente (tipo silvestre) que cuando está ausente (mutante) (Saab *et al.*, 1990).

3.5 Efecto del tamaño del recipiente

El crecimiento y desarrollo limitado de las raíces son a consecuencia de crecer en los recipientes. Las raíces de las plantas en recipientes están más expuestas a las fluctuaciones de las condiciones de la fitósfera ya que la relación entre el área y el volumen de estos recipientes es considerablemente grande por lo que tienen poca capacidad amortiguadora contra las variaciones de las condiciones del medio.

Se han reportado muchas respuestas morfológicas y fisiológicas de las plantas a la variación de los tamaños del recipiente. Al reducir el tamaño del recipiente generalmente aumenta la probabilidad de restricción de la raíz. Cuando las raíces están confinadas en un recipiente que restringe su crecimiento, éstas compiten por los recursos esenciales. El aumento de la masa radical y disminución del espacio para el establecimiento de las raíces induce a la competencia por el oxígeno disponible (Peterson *et al.*, 1991). En general, al disminuir la altura y ancho del recipiente, la cantidad de poros en el medio de cultivo disminuyen, reduciendo el agua a capacidad de sustrato y la aeración (Bilderback y Fonteno, 1987). Aumentando la masa radical más allá de la capacidad del recipiente se reduce la cantidad de espacio poroso. La restricción de la raíz puede imitar el efecto del estrés de humedad del suelo incluso cuando hay suficiente humedad en el suelo para el crecimiento normal de la planta (Krizek *et al.*, 1985). Ismail y Davies (1998) en pimiento encontraron que la restricción de la raíz durante 19 días, disminuyó el crecimiento foliar y de la raíz casi a la tasa mostrada por las plantas expuestas al secado del suelo. Restringiendo el crecimiento de la raíz, la producción de hormonas puede cambiar, afectando el vigor de la planta, tamaño, floración y fructificación.

La tasa de crecimiento de los brotes y raíces son interdependientes (Tonutti, 1990). Las raíces dependen de las proporciones aéreas de la planta para la producción de fotosintatos y varias hormonas, mientras que las proporciones aéreas de la planta dependen de las raíces para la obtención de agua, nutrimentos, sostén y, producción de hormonas. El delicado balance entre las raíces y brotes puede perturbarse cuando el sistema radical es restringido en un volumen de crecimiento pequeño. El desequilibrio resultante puede tener a corto, así como a largo plazo,

efectos sobre el crecimiento de la planta. En investigaciones realizadas se ha encontrado que la variación del tamaño del recipiente altera el volumen radical de las plantas que puede afectar significativamente el crecimiento de la planta. Al respecto, Yusuf *et al.* (2005) encontraron menor longitud y mayor diámetro de raíces en recipientes de menor tamaño, quizás como respuesta natural de las raíces confinadas en espacios reducidos o estrés abióticos que restringen su crecimiento en longitud. El engrosamiento se debe al aumento del diámetro del cilindro central como consecuencia del aumento del número y diámetro de los vasos del xilema, lo cual mejora la conductividad para el paso del agua y puede compensar, al menos parcialmente, la restricción en la absorción por la menor longitud de las raíces (Bennie, 1996); mientras que, en los recipientes de mayor tamaño hubo mayor acumulación de biomasa en la raíz; esto significa que las plantas que son crecidas en el recipiente de mayor volumen, tienen una mayor área para un mayor desarrollo de las raíces. Con relación en la parte aérea, en forma general, el incremento del tamaño del recipiente aumenta el crecimiento del dosel vegetal. Recíprocamente, el crecimiento de plantas en recipiente pequeños causa una restricción de la raíz que a su vez reduce el tamaño del dosel vegetal (Cantliffe, 1993; Tschaplinski y Blake, 1995; Arizaleta y Pire, 2008).

Normalmente se piensa que cualquier tratamiento que restringe el crecimiento de la raíz puede afectar el desarrollo del retoño a causa de una perturbación de relaciones hídricas de la planta. Hameed *et al.* (1987) presentaron fuerte evidencia de la participación del estrés por sequía sobre la disminución del crecimiento foliar y conductancia estomática de las plantas de tomate hidropónicamente crecidas con el espacio de la raíz confinado. Las inhibiciones de elementos nutritivos y absorción de agua son dos de los principales factores que contribuyen a la reducción del crecimiento de los brotes por la restricción del volumen radical. Los recipientes pequeños permiten menos expansión y desarrollo de las plantas reduciendo el número de brotes secundarios y longitud total de todos los brotes (Álvarez y Caula, 1993). Al respecto, estudios realizados en pimiento (NeSmith *et al.*, 1992) y soya (Krizek *et al.*, 1985), han mostrado que el crecimiento de los brotes laterales (ramas) de las plantas disminuye debido a la restricción de la raíz. Los tamaños del recipiente

más grandes produjeron un aumento en la cantidad de materia seca presente en los tallos de tomate (Kemble *et al.*, 1994) y soya (Krizek *et al.*, 1985) cuando se comparó con los recipientes más pequeños. Por lo que se refiere al crecimiento de la hoja, con la disminución del volumen radical, se produjo una reducción del área foliar en plantas de pimiento (Weston, 1988; NeSmith *et al.*, 1992), soya (Krizek *et al.*, 1985), Col (Csizinszky y Schuster, 1993), tomate (Weston y Zandstra, 1986), sandía (Liu y Latimer, 1995), y calabaza (NeSmith, 1993), esta reducción del área foliar fue debido a un menor número de hojas y hojas más pequeñas por planta.

La biomasa y su distribución en la planta, difieren con el tamaño del recipiente para algunas especies, mientras que para otras permanecen constantes. Con respecto a la biomasa, ésta se reduce bajo condiciones restringidas de la raíz posiblemente debido a una menor tasa fotosintética (disminuye la asimilación de CO₂, y la conductancia foliar hasta en un 50 %) (Rieg y Marra, 1993; Ismail y Davies, 1998). Al respecto, estudios con restricción de la raíz han mostrado aumentos en la conductancia estomática en frijol (Carmi *et al.*, 1983), disminución en tomate (Hameed *et al.*, 1987) o no afecta en soya (Krizek *et al.*, 1985). NeSmith *et al.* (1992) en pimiento, reportaron una disminución de la tasa fotosintética total de la planta con el incremento de la restricción de la raíz como la tasa fotosintética foliar, aunque a un grado menor. La disminución en la tasa fotosintética foliar se correlacionó con la disminución en el contenido de clorofila de las hojas. Con la restricción de la raíz en el cultivo de tomate, los asimilados se asignaron preferencialmente a las raíces y en menor grado a las hojas (Krizek *et al.*, 1985). Ambas biomásas de la raíz y brotes de salvia aumentaron linealmente con el volumen del recipiente (van Iersel, 1997). En pimiento y calabaza, la biomasa total de la planta disminuyó con el aumento de la restricción de la raíz, pero no hubo ninguna asignación desproporcional de biomasa a las hojas, tallos, o raíces (NeSmith *et al.*, 1992; NeSmith, 1993).

El desarrollo de la planta puede ser influenciado por el tamaño del recipiente. Así, con el aumento del volumen radical, el tiempo desde la siembra hasta la antesis se acortó para el tomate (Ruff *et al.*, 1987; Kemble *et al.*, 1994) y salvia (van Iersel, 1997). También, se mostró un retraso en la maduración de los frutos por la

restricción radical en plantas de tomate (Ruff *et al.*, 1987). La restricción de crecimiento de la raíz por el volumen del recipiente pequeño indujo a la floración y maduración precoz de los frutos de pimiento (NeSmith *et al.*, 1992; Xu y Kafkafi, 2001). Xu y Kafkafi (2001) reportaron que el factor importante de inducción precoz de los frutos de pimiento fue la interacción entre la concentración nutrimental moderada (6.0-1.0-2.5 me L⁻¹ de N-P-K, respectivamente) y el volumen del recipiente más pequeño (9 L).

La variación en el tamaño del recipiente ha mostrado resultados mixtos en el rendimiento. Ninguna reducción en el rendimiento se mostró para sandía (Hall, 1989; Vavrina *et al.*, 1993), pimiento (Bar-Tal *et al.*, 1990) y brócoli (Dufault y Waters, 1985) con respecto al tamaño del recipiente. Sin embargo, los rendimientos aumentaron en tomate (Weston y Zandstra, 1986), coliflor (Csizinszky y Schuster, 1988), calabaza (Marsh y Paul, 1988), sandía (Liu y Latimer, 1995), melón (Maynard *et al.*, 1996) y pimiento (Weston, 1988) con el incremento del tamaño del recipiente.

La influencia del volumen de la raíz puede relacionarse con el suministro de nutrientes y agua. Si el volumen radical es bajo (ocasionado por recipientes pequeños) la frecuencia del riego debe ser alta, para responder al crecimiento activo de las plantas (Regan, 1999). Así, con una mayor frecuencia de riegos (pasando de riegos cada tercer día a riegos diarios) se aumentó la altura de la planta, número de hojas, materia seca de brote-raíz y la materia seca total en plantas de mango (Ouma, 2007). El contenido volumétrico de agua en el sustrato puede reducirse a cero un día después del riego dependiendo de la profundidad (dado por el tamaño del recipiente) y composición del sustrato. A mayor profundidad del sustrato originado en recipientes más grandes proporciona espacio suficiente para el crecimiento con agua suficiente, pero también requiere riegos adicionales debido a una mayor tasa de evapotranspiración resultado de la mayor biomasa (van Woert *et al.*, 2005).

Muchos investigadores han intentado explicar las causas de los efectos supresores de la restricción de crecimiento de la raíz. Carmi y Heuer (1981) encontraron un potencial de agua de la hoja más alto en plantas con zona radical restringida y sugirieron que un sistema radical limitado restringió el crecimiento del

retoño a través de un sistema hormonal en que por lo menos las giberelinas y citoquininas participan. Ternesí *et al.* (1994) también hizo pensar en la existencia de una señal química (el ABA actuó como una señal química que fue translocada vía xilema a la parte aérea de las plantas) responsable para la inhibición del crecimiento en las plantas con zona radical restringida. Similarmente, Liu y Latimer (1995) trabajando con plantas de sandía mostraron clara evidencia que el volumen limitado de la raíz indujo aumentos en el ABA producido en las raíces, se transportó a los brotes vía savia del xilema de dónde influyó directa o indirectamente en el crecimiento del retoño. Sin embargo, Gallardo *et al.* (1994) sugirieron que cuando el agua está disponible en el sistema radical, no puede haber ningún cambio en la concentración del ABA observada en las hojas debido que la absorción sustancial de agua puede diluir cualquier aumento de ABA producido por las raíces. Aparte del papel de los reguladores de crecimiento endógenos, hay otras posibilidades como la deficiencia en los compuestos aminados (Carmi, 1993), crecimiento más lento por las células meristemáticas que son las células precursoras de las hojas generadas en el primordio (Korner *et al.*, 1989) y una disminución en la respiración de la raíz (Peterson *et al.*, 1991). Muchos investigadores reportan pocos efectos en las plantas con zona radical restringida (Carmi y Heuer, 1981; Krizek *et al.*, 1985). Xu y Kafkafi (2001) al estudiar el efecto del suministro nutrimental y del tamaño del recipiente en la floración, fructificación, asignación de asimilados, y relaciones hídricas en pimiento morrón, concluyeron que manteniendo el contenido de agua del medio de cultivo en el rango de 95-100 % de agua máxima a capacidad del sustrato independientemente del tamaño de recipiente a utilizar, el crecimiento y desarrollo de las plantas no se ve afectado significativamente por el uso de recipientes pequeños (capacidad 9 L) o grandes (18 y 33 L), es decir, el factor clave es el adecuado manejo de la humedad y el suministro de nutrimentos disponibles a las plantas. Bajo las condiciones anteriormente mencionadas, las raíces restringidas fueron más eficientes en la utilización de agua y nutrimentos aumentando la permeabilidad de la raíz (Bar Yosef *et al.*, 1988; Peterson *et al.*, 1991).

3.6 Sustratos

Las técnicas culturales aplicadas en la producción de plantas y hortalizas han experimentado cambios rápidos y notables durante las últimas décadas. Estos cambios están provocados en gran medida por la evolución de los sistemas de control de los factores de producción.

Las estructuras y equipos para el control de los factores ambientales y de producción (invernaderos, equipos de riego y fertilización), han evolucionado para proporcionar un elevado control sobre éstos parámetros que afectan al cultivo. La sustitución del cultivo tradicional en suelo por el cultivo sin suelo sigue esta misma línea evolutiva, aumentando considerablemente la posibilidad de control de los factores de producción relacionados con el entorno radical de la planta. Así, gran parte del éxito en la producción de plantas en maceta o recipiente requiere de una comprensión del ambiente único encontrado en la maceta y cómo éste es afectado por las propiedades físicas y químicas de los sustratos utilizados.

El sustrato es todo material sólido, natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, distinto del suelo *in situ*, que colocado en un recipiente (en forma pura o en mezcla) permite el anclaje del sistema radical (Abad, 1991; Abad y Noguera, 1998), pudiendo intervenir (material químicamente activo) o no (material inerte) en el complejo proceso de la nutrición mineral de la planta. Desde el punto de vista hortícola, la finalidad del sustrato de cultivo es producir una planta o cosecha de calidad y abundante a los menores costos de producción (Abad *et al.*, 1993). Además, el sustrato utilizado no debe provocar un impacto ambiental de importancia.

3.6.1 Función y criterios para la elección de un sustrato

El cultivo en sustrato proporciona, en relación al cultivo en suelo, una mayor capacidad de control de los factores de producción relacionados con el sistema radical de la planta. Esta mayor capacidad de control es posible por la reducción de la capacidad tampón del medio, debida (por una parte) a la reducción del volumen explorado por las raíces y (por otra) a las características propias de los materiales empleados como sustratos de cultivo.

El sustrato óptimo está definido principalmente por las necesidades del material vegetal a utilizar, el tamaño de la maceta, del objetivo del cultivo (producción de: planta, fruto ó flor, etc), de los medios de control disponibles (estructuras de protección del cultivo, sistemas de control de la solución nutritiva y del riego, etc), de las condiciones ambientales del área de producción (temperatura, luz, calidad del agua para riego, etc.).

Para De Boodt (1975) y Michelot (1999), las funciones de un sustrato de cultivo son: proporcionar al sistema radical de la planta el agua y los nutrientes necesarios, y el oxígeno requerido para su respiración, así como el medio físico para el anclaje de la planta.

Hay una gran diversidad de materiales que se pueden emplear para cumplir estas funciones, bien en forma pura o en mezcla, en la preparación de los sustratos de cultivo para las plantas. La elección de un material particular viene determinada generalmente (Bunt, 1988; Handreck y Black, 1991; Abad, 1995) por: a) su suministro y homogeneidad, b) finalidad de la producción, c) costo, d) propiedades y, e) impacto ambiental.

3.6.2 Propiedades de los sustratos de cultivo

Si conocemos con anticipación las características o propiedades (físicas, físico-químicas, químicas y biológicas) de un material podremos conocer su capacidad para ser utilizado sólo o en mezclas para la preparación de sustratos. El objetivo de ésta caracterización es doble; por una parte, la detección de posibles factores limitantes para su utilización como sustrato, y por otra, establecer sus utilidades y limitaciones, así como las pautas de manejo adecuadas (Abad y Noguera, 1998).

3.6.2.1 Propiedades físicas

Las propiedades físicas son consideradas como las más importantes para un sustrato. Esto es debido a que si la estructura física de un sustrato es inadecuada,

difícilmente podremos mejorarla una vez que se ha establecido el cultivo (Raviv *et al.*, 1986).

Un sustrato está constituido por partículas sólidas y espacios libres. En general, para un crecimiento adecuado de plantas cultivadas en macetas, el sustrato debería tener una porosidad total de por lo menos 70 % (con base a volumen). Más importante aún es conocer como la porosidad total está repartida entre aquel espacio ocupado por agua y aire. Los poros de mayor tamaño, generados por la distribución de partículas grandes, son la reserva de aire y los poros finos, por las partículas pequeñas, son los encargados de almacenar agua. El volumen de agua que queda en un sustrato luego de un riego y drenaje del excedente, es su capacidad de retener agua o capacidad de recipiente. Con respecto a este parámetro, un mínimo de 55 % (con base a volumen) es deseable para una maceta o recipiente de 10-15 cm de altura. Asimismo, se desea que el volumen de agua total disponible para la planta debe aproximarse por lo menos 30 % del volumen total del sustrato (Cabrera, 1999). El volumen de aire que se encuentra en los poros de un sustrato cuando se encuentra a capacidad de recipiente es la capacidad de aireación. Al respecto, Cabrera (1999) menciona que aunque el valor mínimo recomendado de porosidad de aireación es 10 % (con base a volumen), éste realmente debe ajustarse de acuerdo a la tolerancia de las plantas a niveles bajos de aireación.

Los sustratos con predominio de poros de tamaño grande necesitan riegos frecuentes ya que, a capacidad de contenedor, gran parte de los poros están ocupados por aire. Cuando predominan los poros pequeños aumenta el volumen de agua retenida luego de un riego, por lo tanto, necesitan menor frecuencia de riego. En síntesis, el tamaño y distribución de partículas, así como la porosidad total de un sustrato determinan sus propiedades hídricas (capacidad de retención y movimiento del agua) que son importantes para el crecimiento de las plantas (Adler, 1992; Terés *et al.*, 1995).

3.6.2.1.1 Características del espacio poroso

El espacio poroso de un sustrato podemos considerarlo como un conjunto de poros individuales interconectados entre sí, formando un sistema único ocupado por

aire y agua. Algunos autores, como Handreck y Black (1991), incluyen en este concepto todos los poros (porosidad total) con independencia de su accesibilidad. Otros, la definen como el volumen total del medio no ocupado por partículas orgánicas o minerales, refiriéndose a la porosidad accesible ó efectiva (Blake y Hartge, 1986; Bunt, 1988; Milks *et al.*, 1989; Martínez, 1992; Ansorena, 1994), la cual es de gran interés desde el punto de vista de su utilización agrícola por intervenir en el intercambio aire-agua.

En el caso de sustratos constituidos por partículas, el espacio poroso está formado por los espacios interparticulares conformados por la superposición de dichas partículas y, en su caso, por los espacios intraparticulares, es decir, por los poros internos de las propias partículas. El tamaño de los primeros depende del tamaño de las partículas y de su grado de empaquetamiento. El tamaño de los poros internos depende del tamaño de las partículas, pero sobre todo, de los procesos que han dado lugar a la estructura de la partícula, sean naturales o artificiales. Tanto el empaquetamiento de las partículas como la estructura de las mismas dan lugar a poros de diferentes tamaños, con una distribución de tamaño característica de cada sustrato. La distribución del tamaño de las partículas y de los poros determina el balance entre el contenido en agua y en aire del sustrato, a cualquier nivel de humedad (Raviv *et al.*, 1986; Bunt, 1988; Handreck y Black, 1991; Ansorena, 1994).

La forma, tamaño y distribución de los poros condiciona las propiedades hídricas del sustrato, y por lo tanto el manejo del agua de riego. El control del riego de un sustrato será tanto más eficaz cuanto más precisa sea la respuesta a las preguntas ¿Cuándo regar? y ¿Cuánto regar?. Las propiedades hídricas del medio poroso (en el que se desarrollan las raíces) informan sobre la evolución de las relaciones aire-agua en el entorno radical, y sobre la disponibilidad de ambos componentes, lo que va a marcar el momento del riego y la cantidad de agua a aplicar.

3.6.2.1.2 Movimiento del agua dentro de un sustrato

En situación de equilibrio, la energía potencial es la misma en todos los puntos. Cuando el potencial en un punto varía, se produce una situación de

desequilibrio, que tiende a establecer un nuevo equilibrio (segunda ley de la Termodinámica). Este razonamiento es aplicable al movimiento de agua en el sustrato de cultivo. Cuando se presenta una situación de desequilibrio, la transformación reversible de energía potencial en cinética (primera ley de la Termodinámica) actúa como medio para restablecer el equilibrio.

El agua, con una energía potencial más elevada, transforma parte de ésta en energía cinética. Se produce el desplazamiento hacia los puntos de potencial más bajo, donde la energía cinética se transforma en potencial (Baber *et al.*, 1991). De esta forma, disminuye el potencial en el punto de potencial más elevado y aumenta en el punto de potencial más bajo. El movimiento cesa cuando el potencial en ambos puntos se iguala. Este razonamiento explica el funcionamiento hídrico del sustrato en las dos situaciones de desequilibrio planteadas: el aporte de agua de riego y la absorción de agua por las raíces. El flujo de agua necesario para el restablecimiento del equilibrio se produce a través de los poros. Los poros actúan, por lo tanto, como conducciones hidráulicas.

Tomamos como punto de partida una situación de equilibrio, en la que el potencial hídrico es igual en todo el sustrato. La absorción de agua por la raíz provoca un descenso local del potencial hídrico, mientras que el resto del sustrato permanece momentáneamente con el potencial inicial más elevado. El mecanismo explicado de transformación de energía potencial en cinética, y viceversa, tiende a restablecer el equilibrio, provocando el flujo de agua hacia las raíces.

El riego se aplica cuando la disponibilidad de agua es baja. Esta baja disponibilidad es consecuencia del bajo contenido hídrico y del bajo potencial hídrico. El aporte del agua de riego supone la entrada en el sistema de agua, con un potencial hídrico muy superior al del agua del sustrato. El mencionado mecanismo de transformación reversible de energías es el responsable de la redistribución del agua en todo el volumen de sustrato, de su re-equilibrio, del aumento del potencial hídrico y, en definitiva, del aumento de la disponibilidad de agua.

3.6.2.1.3 Curva de retención de agua

La dimensión de los poros, y la distribución de tamaños, condicionan la capacidad de almacenamiento y transporte de agua en el medio poroso. La distribución del tamaño de poro da lugar a la curva de retención de agua que relaciona el contenido volumétrico de agua con el estado energético (Milks *et al.*, 1989; Fonteno, 1989). Su utilización en suelos se ha extendido al estudio de las propiedades físicas de los sustratos de cultivo (Bunt, 1961; De Boodt y Verdonck, 1972; Puustjärvi y Robertson, 1975; Fonteno *et al.*, 1981).

3.6.2.1.4 Relaciones hídricas sustrato-planta

La absorción de agua por las raíces de la planta depende de la capacidad: a) de la planta para absorber agua, b) del sustrato para suministrar al sistema radical el agua que necesita la planta y c) de la interacción entre el sistema radical y el sustrato.

La capacidad de la planta para absorber agua depende de factores genéticos (especie, variedad), estado de sanidad y fenológico, etc. La capacidad del sustrato para suministrar agua a la planta depende de sus propiedades físicas, como la capacidad de almacenamiento y de transporte de agua. El agua se almacena en los poros del sustrato. Las raíces absorben el agua de los poros más próximos; esto desequilibra el sistema, que tiende a reponer el agua, transportándola de los poros más alejados. La capacidad para transportar el agua, y en consecuencia para reponer el equilibrio, es una característica propia del sustrato que depende de las características del espacio poroso y se mide mediante la conductividad hidráulica. La interacción entre el sistema radical de la planta y el sustrato puede entenderse si se tiene en cuenta la actividad respiratoria de las raíces y la complementariedad de los volúmenes ocupados por aire y por agua en el espacio poroso. El sistema radical tiene actividad respiratoria; en consecuencia, se produce un intercambio gaseoso con el entorno, con una demanda neta de oxígeno y producción de CO₂. El consumo de oxígeno produce una situación de asfixia radical, que reduce la capacidad de la planta para absorber el agua disponible en el sustrato. Para un sustrato determinado,

cuanto más elevada es la disponibilidad de agua, menor es la disponibilidad de aire, y más probable es alcanzar esta situación de asfixia, en la que, a pesar de la alta disponibilidad del agua, ésta no es útil para la planta, por la reducción de la capacidad de absorción.

La multitud de factores que inciden en la absorción de agua, supone un importante problema para definir el agua disponible de un sustrato. Al respecto, Fonteno (1993) concluye que dentro del término agua disponible deben considerarse los de disponibilidad de agua y capacidad de agua disponible. Por su parte, De Boodt y De Waele (1968) consideran que el agua del sustrato tiene que estar disponible a un nivel energético tan bajo como sea posible, considerando que, al mismo tiempo, debe haber aire disponible suficiente en los poros de la zona radical.

La incidencia en la absorción de agua de los factores mencionados hace muy complejo su estudio. Podemos considerar que las características de la planta determinan las condiciones físicas, disponibilidad de aire y de agua, que debemos disponer en el entorno radical para cubrir las necesidades de dicha planta. Los instrumentos disponibles para conseguir estas condiciones son las características físicas del sustrato y el manejo del agua de riego.

3.6.2.2 Propiedades físico-químicas y químicas

Las propiedades físico-químicas y químicas caracterizan la transferencia de materia entre el sustrato y la solución del mismo (André, 1987): reacciones de disolución e hidrólisis de los constituyentes minerales (propiedades químicas), reacciones de intercambio de iones (propiedades físico-químicas) y reacciones de biodegradación de la materia orgánica (propiedades bioquímicas).

Los materiales orgánicos son los componentes que contribuyen mayoritariamente a la actividad química de los sustratos, debido a la formación y presencia de sustancias húmicas (productos finales más importantes de la descomposición de la materia orgánica).

Otros aspectos químicos importantes son el pH y el nivel de salinidad. El pH indica el grado de acidez o de alcalinidad; es una característica que influye sobre el crecimiento y la cantidad de nutrimentos disponibles en el sustrato para que los tomen las plantas. Los sustratos pueden presentar cantidades elevadas de sales, medida a través de la conductividad eléctrica. Los altos contenidos de sales pueden ocasionar problemas a la producción, por ejemplo: inhibición de la germinación de las semillas, reducción marcada del crecimiento, quemado del borde de las hojas, muerte de raíces con aumento de la predisposición al ataque de enfermedades.

3.6.2.3 Materia orgánica (nutrimentos “asimilables”)

Es de gran importancia conocer cuál es la riqueza del medio de crecimiento (sustrato) para resolver la necesidad de enriquecerlos en caso de ser necesario. La mayoría de los sustratos minerales no se descomponen química ni biológicamente y, desde un punto de vista práctico, se pueden considerar desprovistos de nutrimentos (ejemplo: arena, perlita, vermiculita, roca volcánica, etc.) siendo imprescindible la adición de elementos nutritivos. Por el contrario, los sustratos orgánicos difieren entre sí en el contenido en nutrimentos asimilables. Así, algunos (turba, *Sphagnum*, etc.) poseen un nivel reducido de nutrimentos asimilables, mientras que otros, como por ejemplo las compostas (lombricomposta, estiércoles de animales, etc.), presentan niveles elevados, dependiendo del origen de la composta y del proceso de compostaje (Raviv *et al.*, 1986; Burés, 1997).

Desde el punto de vista de las características físicas, sólo algunas compostas (lombricomposta) se aproximan a los rangos óptimos para ser considerados un buen sustrato como único componente de la formulación. El Cuadro 3.1, muestra las propiedades físicas y químicas de la lombricomposta, donde se observa que la densidad aparente y la densidad real presentan valores cercanos al óptimo, mientras que los valores de capacidad de retención de agua y espacio poroso total son menores a los considerados adecuados como sustratos para plantas. Además, se confirma que contienen alta concentración de nutrimentos solubles, cuya concentración se relaciona en forma directa con la conductividad eléctrica (>2.50 dS

m⁻¹), con un pH de neutro a ligeramente alcalino no siendo una limitante para el crecimiento de las plantas.

Cuadro 3.1. Parámetros físicos y químicos de las lombricompostas (Raviv *et al.*, 1986)

Propiedades	Valores observados			
	Promedio	Máximo	Mínimo	Óptimo (*)
Físicas				
Humedad (%) (**)	38.62	78.76	11.35	35-45
Densidad real (g cm ⁻³)	2.09	2.31	1.76	---
Densidad aparente (g cm ⁻³)	0.41	0.53	0.24	<0.40
Espacio poroso total (% v/v)	80.00	85.88	72.02	>85.00
Espacio poroso con aire (% v/v)	31.97	54.61	9.42	15-30
Capacidad de retención de agua (% v/v)	48.10	62.60	26.96	55-70
Químicas				
Materia orgánica (%) (**)	34.88	65.59	12.39	20-45
pH (acidez o alcalinidad)	7.04	7.95	6.40	7.00
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	1.38	2.90	0.40	<2.50

(*) Valores óptimos para sustratos (**) Valores óptimos para lombricompostas

Varios autores coinciden que para optimizar la composta como sustrato, es preferible, mezclar en un recipiente, composta, por la alta cantidad de elementos nutritivos, con medios inertes (ejemplo: turba, perlita, entre otros), ello mejora las características físicas y químicas de la mezcla del sustrato y evita la hipoxia (Castillo *et al.*, 2000; Hashemimajd *et al.*, 2004). Sin embargo, para que estas mejoras surtan efecto, es necesario que los componentes del sustrato o mezcla tengan un tamaño deseable de partículas. La mayoría (≥ 60 %) de las partículas en componentes orgánicos como inorgánicos para sustratos deberán encontrarse entre 0.5 y 4.0 mm, y con menos del 20 % presente en partículas más finas que 0.5 mm (Cuadro 3.2) (Cabrera, 1999).

Cuadro 3.2. Recomendaciones de granulometría para la selección de materiales orgánicos e inorgánicos a usarse en la preparación de sustratos para producción en maceta

Diámetro de partícula (mm)	Proporción deseada (% con base a peso)
10.0-2.0	< 20
2.0-0.5	> 60 (100% ideal)
< 0.5	< 20

Fuente: Cabrera (1999)

Este mismo autor menciona que debe utilizarse una cantidad suficiente de componentes orgánicos en los sustratos para permitir cambios importantes en sus propiedades físicas. Generalmente debe utilizarse por lo menos un 40 % de componente orgánico para obtener beneficios adecuados. Además de los requisitos de granulometría y volumen de incorporación, un componente orgánico deberá ser estable con respecto a su descomposición, es decir, deberá haber pasado por un proceso de compostaje.

De los principales elementos nutritivos presentes en la composta, de 70-80 % de fósforo y de 80-90 % de potasio están disponibles el primer año, mientras que el nitrógeno (N), todo es orgánico, es decir, debe mineralizarse para ser absorbido por las plantas, no obstante, en el primer año, sólo se mineraliza el 11 %, generándose una deficiencia de este elemento, si no es suplido apropiadamente (Eghball *et al.*, 2000; Heeb *et al.*, 2005; Rosen y Bierman, 2005). Al respecto, Raviv *et al.* (2004; 2005) señalan que los nutrimentos contenidos en la composta satisfacen los requerimientos del tomate de dos a cuatro meses después del trasplante. Por su parte, Márquez y Cano (2005) determinaron que los elementos nutritivos contenidos en la composta, fueron suficientes para obtener producciones aceptables en tomate cherry.

En cualquier caso, y para un crecimiento óptimo de la planta, deberán añadirse siempre nutrimentos adicionales como fertilizantes de base y/o como fertilizantes durante el ciclo de cultivo aplicándose usualmente a través del sistema de riego (Raviv *et al.*, 1986; Cadahía y Fernández, 1992; Cadahía, 1995).

En todo caso, y para conocer si el plan de fertilización es correcto, es necesario comparar la disolución nutritiva de riego con la del sustrato y los drenajes. Esta información puede completarse con el análisis de los tejidos vegetales y la observación visual de las plantas (Cadahía, 1988; Cadahía y Fernández, 1992).

3.7 Factores ambientales

Se han identificado más de 20 factores importantes para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Los más importantes son: nutrición, malezas, plagas y

enfermedades, temperatura (diurna y nocturna), humedad relativa, radiación luminosa y CO₂ (Caldari, 2007). Las variaciones en las condiciones ambientales pueden llegar a imponer serias restricciones para el crecimiento y desarrollo de las plantas y, por lo tanto, provocar sobre ellos situaciones de estrés. El concepto de “estrés” implica la presencia de un factor externo a la planta, provocado por el ambiente cambiante, que ejerce una influencia negativa sobre su crecimiento y desarrollo óptimos. El correcto manejo de los factores climáticos son aspectos fundamentales para un adecuado desarrollo del cultivo del pimiento. El conocimiento del rango de valores óptimos facilitará un apropiado manejo del cultivo.

3.7.1 Temperatura

Es el parámetro más importante a tener en cuenta en el manejo del ambiente dentro de un invernadero, ya que es el que más influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Caldari, 2007). La influencia de la temperatura en el desarrollo fenológico de los cultivos es preponderante tanto en la velocidad de crecimiento de las plantas como en la intensidad de la floración y la rapidez de la maduración de la fruta, por lo que marca las épocas de siembra (Tun *et al.*, 2004). Para el manejo de la temperatura es importante conocer las necesidades y limitaciones de la especie cultivada.

Diversos estudios demuestran que la temperatura y la humedad relativa a la intemperie alcanzan niveles extremos por lo que pueden dañar la planta y se tiene evidencia de la correlación existente entre la temperatura ambiental y el déficit de presión de vapor, con la temperatura foliar, con consecuencias fisiológicas negativas para la planta. Las plantas expuestas a dichas condiciones, caen en una condición de enfermedad de tipo abiótico, y son susceptibles al ataque de plagas y enfermedades de tipo biótico (Bustamante, 2001).

El pimiento es un cultivo de estación cálida y comparado con otras especies de solanáceas necesita de temperaturas más altas que el tomate, y más bajas que la berenjena (IFA, 2006).

3.7.1.1 Rango de temperatura óptima

Las plantas presentan una curva de respuesta a la temperatura, con un óptimo que determina una tasa de crecimiento máxima y un rango de temperatura máxima y mínima fuera del cual el desarrollo se detiene. Los valores de temperaturas máximas y mínimas críticas y óptimas son variables, dependiendo de la especie y de la etapa de desarrollo en estudio.

La temperatura ideal para pimiento oscila entre 18 y 28 °C (Cuadro 3.3). La combinación de un régimen de 15.6 °C en la noche y 21.1 °C durante el día, unido a un alto nivel de humedad en el suelo, incrementa los niveles de fructificación (Cochran, 1936).

3.7.1.2 Temperaturas nocturnas y diurnas

Las temperaturas nocturnas condicionan, en términos generales, el crecimiento de la planta de pimiento y en particular los procesos de floración y fructificación. En investigaciones realizadas en pimiento por Rylsky (1973), encontró que temperaturas nocturnas de 20 °C después de floración aumentaron el tamaño del fruto y el número de semillas, acelerando su desarrollo. Además hubo una correlación positiva entre el peso del fruto y el número de semillas, es decir, a mayor número de semillas por fruto aumentó el peso del mismo. Por su parte, Rylski y Spigelman (1982), encontraron en el cultivo de pimiento que las temperaturas bajas nocturnas (15 °C) aumentaron la fructificación; sin embargo, indujeron la formación de frutos más pequeños y partenocárpicos (sin semillas). En contraste, altas temperaturas nocturnas (24 °C) en combinación con baja humedad relativa provocaron la caída de flores. Los autores llegaron a la conclusión que estos comportamientos se debieron porque las temperaturas nocturnas altas y bajas indujeron la producción de polen improductivo. Las razones fisiológicas que pueden explicar el bajo amarre de frutos en condiciones de temperaturas altas pueden ser encontradas en un exceso de transpiración por parte de la planta o en una insuficiente translocación de azúcar (Rylsky, 1973).

Cuadro 3.3. Temperaturas críticas para pimiento en las distintas fases de desarrollo

Fases del cultivo	Temperatura (°C)		
	Óptima	Mínima	Máxima
Germinación	20 – 25	13	40
Crecimiento vegetativo	20 – 25 (día)	15	32
	16 – 18 (noche)		
Floración y fructificación	26 – 28 (día)	18	35
	18 – 20 (noche)		

Fuente: Cochran (1936)

3.7.2 Humedad relativa (HR)

La humedad relativa es la cantidad de vapor de agua contenida en el aire, en relación con la máxima que sería capaz de contener a la misma temperatura. Existe una relación inversa de la temperatura con la humedad por lo que a elevadas temperaturas, aumenta la capacidad de contener vapor de agua y por tanto disminuye la HR. Con temperaturas bajas, el contenido en HR aumenta.

La HR del aire es un factor climático que puede modificar el rendimiento final de los cultivos. Cuando la HR es excesiva las plantas reducen la transpiración y disminuyen su crecimiento, se producen abortos florales por apelmazamiento del polen y un mayor desarrollo de enfermedades criptogámicas. Por el contrario, si es muy baja, las plantas transpiran en exceso, pudiendo deshidratarse, además de los comunes de bajo amarre de frutos.

3.7.3 Luz

Es un factor imprescindible para llevar adelante una serie de procesos fisiológicos en las plantas, siendo el más importante de todos la “fotosíntesis”. Los pigmentos vegetales involucrados en la fotosíntesis son las antocianinas, carotenoides (absorben 450-500 nm), clorofila y los fitocromos (absorben 660-730 nm) (Caldari, 2007).

Las plantas absorben radiación en sus celdas de clorofila de una longitud de onda que va desde 400-700 nm (45 al 50 % de la radiación global) y lo usan como energía para la fotosíntesis (para transformar CO₂ en carbohidratos). Esta radiación es llamada radiación fotosintéticamente activa (RAF, expresado en Julios s⁻¹ m⁻²) y,

determina la cantidad de carbohidratos producida en las hojas durante la fotosíntesis. A mayor producción de carbohidratos, el rendimiento de las plantas aumenta (Nederhoff, 2001).

La luz actúa sobre la asimilación de carbono, la temperatura de las hojas y en el balance hídrico, y en el crecimiento de órganos y tejidos, principalmente en el desarrollo de tallos, expansión de hojas y en la curvatura de tallos, interviene también, en la germinación de semillas y en la floración. La luz y la temperatura están directamente correlacionadas. En niveles altos de luz hay mayor temperatura y a mayores niveles de temperatura hay mayor transpiración y consumo de agua. En contraste, plantas que son cultivadas bajo influencia de mucha sombra reciben abundante luz de las fracciones azul y roja y tienden a tener un crecimiento más largo y delgado por una tasa fotosintética más baja (Caldari, 2007).

El pimiento es una planta muy exigente en luminosidad, sobre todo en la fase reproductiva (Prieto *et al.*, 2003). Al respecto, al sombrear un cultivo de pimientos se obtuvo un 42 % más de caída de flores, dando como resultado un 65 % en la disminución del rendimiento (Wien, 1994). Ello es debido a que la sombra reduce la concentración de carbohidratos en los brotes florales, incrementa la producción de etileno junto a los brotes aumentando la abscisión de flores (Aloni *et al.*, 1999). Sin embargo, en Yucatán Tun *et al.* (2004), al evaluar diferentes cultivares de chile bajo condiciones de baja luminosidad (malla sombra) concluyeron que, la altura mayor de las plantas y la reducción de la incidencia y severidad de la virosis, como efecto de la protección con malla sombra, dieron por resultado el incremento del rendimiento y calidad del fruto de los cultivares de chile evaluados.

3.7.4 CO₂

El dióxido de carbono de la atmósfera es la materia prima imprescindible para la formación de carbohidratos en las plantas. La concentración normal de CO₂ en la atmósfera es del 0.03 % y, a través de varias investigaciones se ha encontrado que si se desea maximizar la actividad fotosintética de las plantas, ésta concentración debe aumentarse a límites de 0.1-0.2 %, cuando los demás factores involucrados en

la producción vegetal (temperatura, radiación fotosintéticamente activa, humedad del suelo, humedad relativa, nutrición, etc.) sean óptimos; sin exceder concentraciones de 0.3 % ya que resultan tóxicas para los cultivos.

En los invernaderos la concentración de este gas es muy variable a lo largo del día. Alcanza el máximo de la concentración al final de la noche y el mínimo a las horas de máxima luz que coinciden con el mediodía. En un invernadero cerrado por la noche, antes de que se inicie la ventilación por la mañana, la concentración de CO₂ puede llegar a límites mínimos de 0.005-0.01 %, que los vegetales no pueden tomarlo y la fotosíntesis es nula.

Los niveles recomendados de CO₂ dependen de la especie o variedad cultivada, de la radiación solar, de la ventilación, de la temperatura y de la humedad. El óptimo de asimilación está entre los 18 y 23 °C de temperatura, descendiendo por encima de los 23-24 °C. El efecto que produce la fertilización con CO₂ sobre los cultivos hortícolas, es el de aumento de la precocidad (20 %) y aumento de los rendimientos (25-30 %), mejora la calidad del cultivo así como la de su cosecha. Sin embargo, no se puede hablar de una buena actividad fotosintética sin una luminosidad óptima.

En condiciones de déficit de humedad, uno de los mecanismos más importantes en la conservación de agua por la planta es el que lleva a una disminución de la transpiración que puede ser un mal inevitable, pues es necesario abrir los estomas para captar CO₂. Desafortunadamente, esta pérdida no es un intercambio entre una molécula de CO₂ por una molécula de agua, sino que se pierde más agua por cada CO₂ fijado. A una temperatura y humedad relativa de 20 °C y 100 %, respectivamente, se pierden 20 moléculas de agua por cada una de CO₂. Sin embargo, si la temperatura incrementa a 50 °C y disminuye la humedad al 30% la relación agua perdida/CO₂ fijado es más de 600 moléculas de agua por molécula de CO₂ fijado, incluso se puede incrementar esta relación. Una estimación de agua perdida/CO₂ fijado se hace por el coeficiente de transpiración [cantidad de agua (L) usada por la planta para producir un kg de materia seca] (Taiz y Zeiger, 2002).

Para muchas especies de plantas la concentración de CO₂ sub-estomática permanece constante a pesar de una amplia gama de condiciones ambientales (Pearcy, 1981). Bajo condiciones de déficit hídrico, Luvaha (2005) reportó ningún efecto sobre la concentración de CO₂ sub-estomática. El poco efecto sobre la tasa de asimilación de CO₂ puede ser debido al poco incremento en la conductancia estomática.

Al aumentar la frecuencia de riegos (pasando de riegos cada tercer día a riegos diarios) se incrementó significativamente la tasa de asimilación de CO₂, la tasa transpiratoria y conductancia estomática (Ouma, 2007). Existiendo niveles reducidos de los parámetros anteriores a las más bajas frecuencias de riegos (bajos potenciales de agua en el mesófilo) (Schulze y Koppers, 1979), disminuye la conductancia estomática (Blackman y Davies, 1985), y estimula a un aumento en la concentración de ácido abscísico (ABA) y rápido flujo de iones estimulantes de las células guarda causando así el cierre de los estomas (Raschke y Hedrich, 1985).

3.8 Descripción taxonómica

La planta pertenece al reino Vegetal, phylum Antophyta, orden Tubiflorae, familia Solanaceae y género *Capsicum* (Cuadro 3.4); según Tournefort en 1700 y más tarde confirmado por Linneo en su “Genera Plantarum” en 1742.

Cuadro 3.4. Clasificación taxonómica del pimiento

Reino:	Vegetal
Subreino:	Embriophyta
Phyllum:	Antophyta
Clase:	Angiospermae
Subclase:	Dicotiledoneae
Orden:	Tubiflorae
Familia:	Solanaceae
Subfamilia:	Solanoideae
Tribu:	Capsiceae
Género:	<i>Capsicum</i>
Especie:	<i>annuum</i>
Nombre científico: <i>Capsicum annum L.</i>	

Fuente: Antonio (2000)

Linneo describió dos especies: *C. annuum* y *C. frutescens*, basándose principalmente en la duración de su ciclo vegetativo; considerando a los tipos de *C. annuum* como anuales y a las *C. frutescens* como perennes (Antonio, 2000).

3.9 Descripción morfológica

El pimiento es una planta herbácea sin pubescencia, con un tallo que puede llegar a ser semileñoso, de hábito perenne en condiciones naturales, pero cultivada como anual en la mayoría de los casos, debido a su susceptibilidad a heladas. Generalmente inicia su ramificación a menos de 20 cm del suelo, dividiéndose en dos o tres ramas, las cuales a su vez se bifurcan (Figura 3.4) (Laborde, 1984).

a) Raíz. Es pivotante reforzada con un gran número de raíces adventicias; puede alcanzar una profundidad de 0.50 a 1.0 m con un radio de 0.50 m.

b) Tallo. Presenta crecimiento determinado e indeterminado según el cultivar; a partir de cierta altura, emite 2 o 3 ramificaciones (dependiendo de la variedad) y continúa ramificándose de forma dicotómica hasta el final de su ciclo. Puede alcanzar un porte de 0.5 a 2.5 m (Antonio, 2000).

c) Hoja. La inserción de las hojas en el tallo, son alternas y su tamaño es variable en función de la variedad; son glabras, enteras y oval- lanceolada, de color verde intenso. Existe correlación entre el tamaño de hoja adulta y el peso medio del fruto.

d) Flor. Son flores perfectas y se presentan solitarias en las axilas de las ramificaciones; de tamaño pequeño (1 cm aproximadamente), con cáliz dentado, corola con cinco pétalos de color blanco y anteras amarillenta-azules o púrpuras. La polinización es autógama, aunque puede presentarse un porcentaje de alogamia que no supera el 10 %. Las flores son hermafroditas con ovario súpero, que puede ser di o trilocular; el estigma por lo regular se encuentra a la altura de las anteras, lo que facilita la polinización. Cada planta produce varios centenares de flores, que pueden llegar a cuajar al 100 % en el tallo principal al inicio de la floración; bajan al 80 % en

las flores posteriores al mismo tallo y hasta el 10 % en las flores de las ramas laterales (CENIAP, 2000).

e) Fruto. Es una baya hueca de características muy variables; se compone del pericarpio, endocarpio y semillas. El pericarpio inicia su crecimiento cuando se produce la fecundación de los óvulos. Su peso fluctúa entre unos pocos gramos o incluso a más de 500 g, ello depende del número de semillas presentes en cada fruto, de tal modo que cuando hay pocas semillas el volumen y peso del fruto es menor; la forma varía entre redonda, acorazonada, aguzada, cilíndrica y cuadrada, con color externo de blanco a negro, aunque predominan los colores amarillos, verdes y rojos (Antonio, 2000).

f) Semilla: Tienen forma aplanada, ligeramente reniforme; son lisas, sin brillo y de color blanco-amarillento, con una longitud promedio de 3 a 5 mm dispuestas sobre placenta cónica de disposición central. El poder germinativo de las semillas frescas, es en general de 95 a 98 % y si las condiciones de conservación son favorables se mantienen de 4 a 5 años viables (Laborde, 1984).

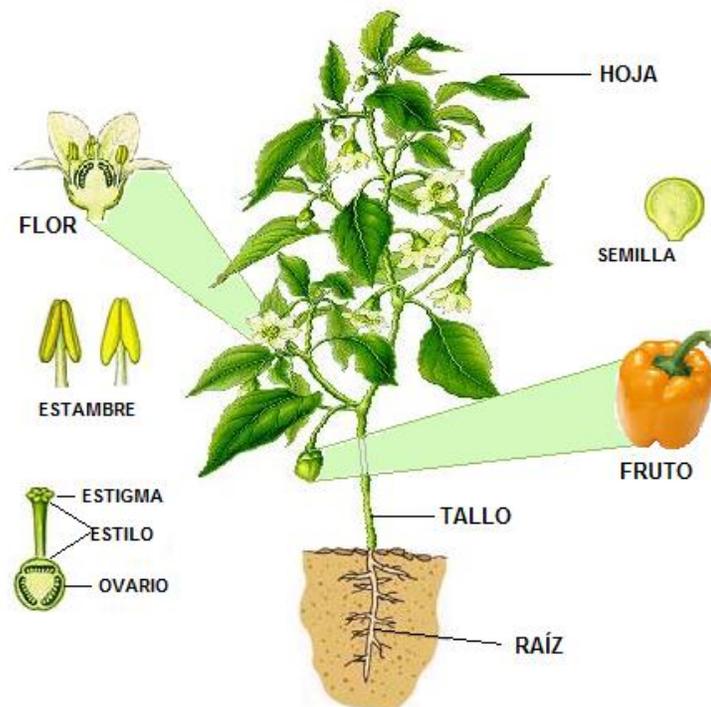


Figura 3.4. Morfología de la planta de pimiento

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Ubicación

El experimento se llevó a cabo en condiciones de hidroponía e invernadero, ubicado en el Posgrado de Botánica del Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados, México, a 2250 msnm, 19° 21' Latitud Norte y 98° 54' Longitud Oeste, del 06 de febrero al 12 de julio del 2010 (ciclo primavera-verano). El invernadero utilizado es de tipo túnel con estructura de metal y cubierta de plástico (Figura 4.1), sin control de temperatura ni humedad relativa, malla anti-áfida en las paredes laterales y cubierta "ground cover" color blanco sobre la superficie del suelo.

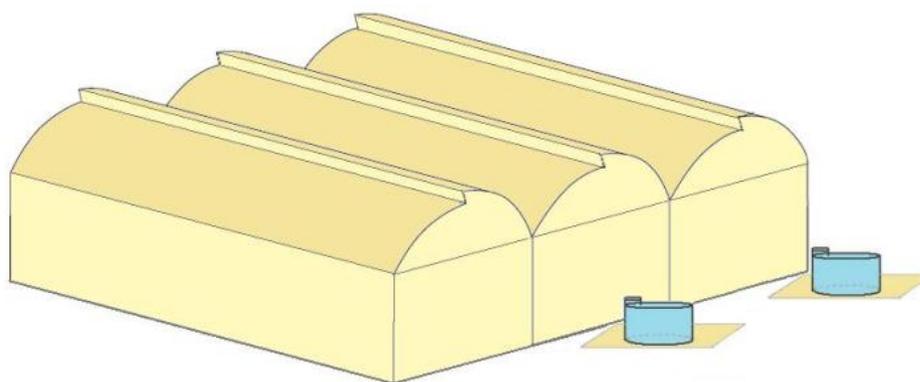


Figura 4.1. Área de estudio

4.2 Caracterización física de los sustratos

Como ya se mencionó anteriormente, la caracterización de los sustratos juega un papel vital para alcanzar los objetivos deseados, ya que del conocimiento de las propiedades y de un buen manejo se garantiza el éxito de un cultivo. Para definir las estrategias de manejo del riego en el cultivo, es necesario conocer el volumen ocupado por la fracción sólida, líquida y gaseosa, así como su variación en función del potencial matricial aplicado. Sólo así es factible conocer como funciona este medio para el crecimiento de las raíces y para el abastecimiento de agua y nutrimentos al cultivo (Castellanos y Vargas, 2004). Al respecto, es importante conocer la curva de liberación de agua para cada sustrato entre el rango de tensión de 0 y 100 cm de carga de agua (c.a), ya que en varias investigaciones (De Boodt *et*

al., 1974; Verdonck *et al.*, 1984) se ha demostrado que las plantas restringen su crecimiento cuando el agua en el sustrato está retenida a tensiones superiores a 100 cm de c.a. por lo que se considera que ha esta tensión el agua es un factor limitante para la producción de plantas en recipiente. En la presente investigación, se determinó: 1) densidad aparente (D_a) por método de la probeta, 2) densidad real (D_r) por el método de pícnometría, 3) espacio poroso total (EPT), capacidad de aireación (CA), capacidad de retención de agua (CRA) y, 4) curva de liberación de agua, en ambos sustratos evaluados (tezontle y composta). Además de su conductividad eléctrica (C.E.).

4.3 Calibración del TDR con ambos sustratos

La calibración consistió en la comparación de las lecturas (θ_v) del equipo con los valores de humedad volumétrica (θ_v) calculados a partir de la humedad gravimétrica y la densidad aparente de cada sustrato utilizado.

Las mediciones se realizaron asegurando un rango prudente de humedad que permitiera obtener resultados confiables para realizar una buena comparación, para ello algunas muestras (todas contenidas en recipientes de 18 L de capacidad) se llevaron a capacidad de campo, otras se secaron al aire libre y otras se dejaron en un rango intermedio de humedad. Se seleccionaron 13 y 16 puntos de medición (para composta y tezontle, respectivamente) y la toma de las lecturas del θ_v se realizó de la siguiente manera:

- a) Los recipientes que contenían las muestras de sustrato seleccionadas se dividieron en tres estratos de muestreo (Figura 4.2).

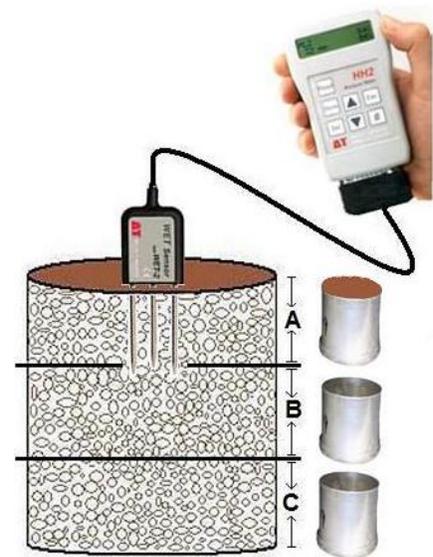


Figura 4.2. Lecturas del θ_v con el TDR en tres estratos del recipiente para su posterior comparación con el θ_v obtenida a partir de la humedad gravimétrica y la densidad aparente de cada sustrato utilizado

- b) En cada uno de los estratos se realizaron lecturas con el TDR con varillas de 6.35 cm de longitud, empezando en la parte media superior del recipiente (Figura 4.2). Simultáneamente, se tomaron muestras de suelo de cada estrato (en la zona de medición con el TDR) y se colocaron en cilindros metálicos de 5.5 x 8.0 cm (diámetro y altura, respectivamente).
- c) La densidad aparente de cada muestra se determinó a partir del volumen que ocupó en los cilindros, una vez asentada la muestra. El asentamiento de las muestras se realizó dejando “caer” tres veces el cilindro sobre una superficie plana, y desde una altura de 20 cm aproximadamente.
- d) El contenido de agua (θ_g) de cada muestra se determinó por el método gravimétrico (pérdida de peso a 105 °C) y los resultados se transformaron a humedad volumétrica (θ_v) con la densidad aparente correspondiente, utilizando la ecuación que relaciona ambos parámetros (Hillel, 1980):

$$\theta_v = \theta_g Da/Dw$$

donde:

θ_v = contenido volumétrico de agua

θ_g = contenido gravimétrico de agua

Da = densidad aparente del suelo (g cm^{-3})

Dw = densidad del agua (se asume igual a 1 g cm^{-3})

Da/Dw = densidad específica aparente

- e) Los valores de humedad volumétrica obtenidos con el TDR para cada estrato se compararon con los valores de humedad volumétrica calculados para los mismos estratos. Posteriormente se realizaron análisis de regresión entre los valores de humedad volumétrica calculados y los valores de humedad volumétrica obtenidos con el TDR para evaluar el grado y tipo de asociación entre estas dos variables, obteniendo así, la ecuación de calibración para cada sustrato evaluado.

4.4 Material vegetal

Se utilizaron semillas de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.) híbrido Cannon, de crecimiento indeterminado.

4.5 Siembra y establecimiento del experimento

4.5.1 Obtención de plántula

Previo a la siembra, se realizó un tratamiento de pre-germinación, que consiste en remojar las semillas por un periodo de 24 h, esto con el objetivo de promover una germinación uniforme. La siembra se efectuó el día 6 de febrero de 2010 en charolas de polietileno de 50 cavidades, con dimensiones de 53 x 26 x 6 cm (largo, ancho y profundidad, respectivamente) en las que se utilizó composta como sustrato, en cada cavidad se colocó una semilla a 0.5 cm de profundidad. Las charolas se regaron con agua desde la siembra hasta la emergencia (22 de febrero) de todas las plántulas. Posteriormente a la emergencia (30 días después de la emergencia “dde”) las plántulas se regaron alternadamente con solución nutritiva Steiner con un potencial osmótico ($\Psi\pi$) de -0.036 MPa y agua, por el método de inmersión (Figura 4.3). Para prevenir la incidencia de enfermedades fungosas se realizaron aplicaciones de PREVICUR® 72.2 % (propamocarb HCL) en dosis de 0.5 mL L⁻¹ de agua junto con el riego.



Figura 4.3. Plántulas de pimiento morrón (44 dde) y riego por inmersión

4.5.2 Trasplante

El trasplante se realizó a los 53 dde (15 de abril) cuando las plántulas presentaron la sexta hoja expuesta y altura de 20 cm aproximadamente. Para los tratamientos con SPR, la raíz se dividió longitudinalmente en dos partes iguales con una navaja de un sólo filo, desde unos milímetros por arriba del cuello de la raíz

hasta su ápice (Figura 4.4a). Posteriormente, las plántulas se trasplantaron en dos bolsas de polietileno de 25 x 30 cm (capacidad 9 L), una para cada sección de la raíz, unidas en el centro con cinta adhesiva (Figura 4.4b).

Un grupo de plantas se mantuvo con la raíz intacta y fueron consideradas como plantas testigo, las cuales fueron trasplantadas en bolsas de polietileno de capacidad de 18 L (Figura 4.4c), ello con el objetivo de proveer a todas las plantas (todos los tratamientos) el mismo volumen de sustrato para su crecimiento. Estableciéndose 3.2 plantas m⁻², en un sustrato de roca volcánica porosa (tezontle con el 90 % de su granulometría \geq de 2.0 mm y el 10 % restante entre 0.84 y 0.074 mm y, una retención de humedad de 2.6 L) y en un sustrato de composta (retención de humedad de 6.5 L).



Figura 4.4. Separación del sistema radical y trasplante

4.6 Tratamientos y diseño experimental

Se utilizó el diseño experimental completamente al azar con arreglo en parcelas divididas (Figura 4.5) con: dos factores [sustrato (ubicado en la parcela grande) y humedad aprovechable residual “HAR” (ubicado en las parcelas chicas)], seis niveles y 4 repeticiones por tratamiento (Cuadro 4.1 y Figura 4.6). En este

trabajo se estudió la respuesta del cultivo de pimiento morrón, a dos niveles de secado parcial de la raíz y riego convencional y al tipo de sustrato. La implementación de estos niveles (Cuadro 4.1) en las unidades experimentales originaron los siguientes tratamientos: Tratamientos con tezontle ó composta como sustrato: **1 y 5)** SPR80-80, con raíz dividida, en donde se dejó que la HAR del sustrato en ambos recipientes llegara al 80 % para aplicar el riego y llevarlo nuevamente a CC, es decir, se dejó evapotranspirar el 20 % de la HAR, **2 y 6)** SPR80-30, con raíz dividida, en donde se dejó evapotranspirar el 20 % de la HAR del sustrato en uno de los recipientes (lado húmedo), mientras que en el otro recipiente se dejó evapotranspirar el 70 % de la HAR del sustrato (lado seco) para aplicar el riego y llevarlos nuevamente a CC, es decir, el crecimiento de la planta en este tratamiento se mantuvo en una HAR del sustrato de 80 y 30 % (lado húmedo y seco, respectivamente), a los 15 d después, el riego se alternó permitiendo que el lado con déficit de humedad recibiera riego y el otro lado comenzara a secarse y así sucesivamente, **3 y 7)** testigo (80 %), con el sistema radical completo “riego convencional”, donde se permitió evapotranspirar el 20 % de la HAR del sustrato para aplicar el riego y llevarlo a CC, en este tratamiento, el crecimiento de la planta se mantuvo en una HAR del sustrato de 80 % y, **4 y 8)** testigo (50 %), con el sistema radical completo “riego convencional”, donde se permitió evapotranspirar el 50 % de la HAR del sustrato para aplicar el riego.

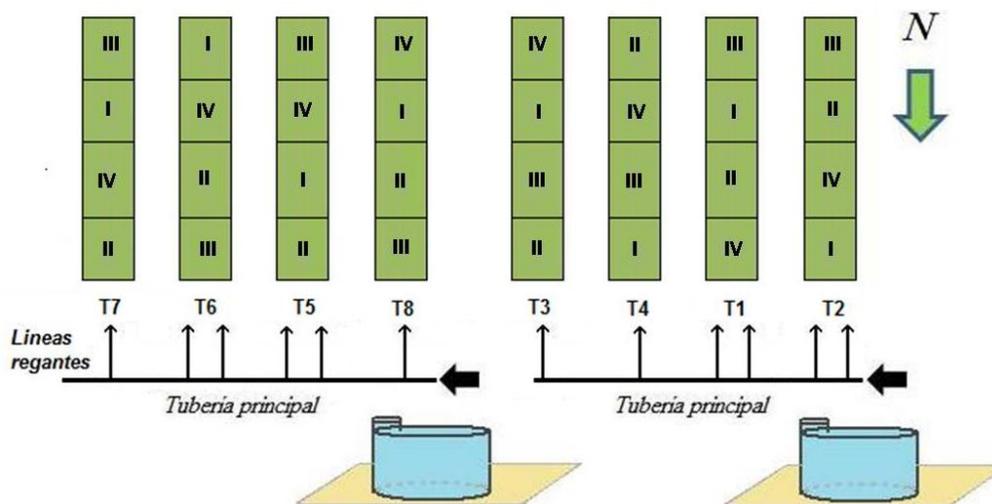


Figura 4.5. Distribución de los tratamientos en el área de estudio

Cuadro 4.1. Factores, niveles y tratamientos en estudio

Sustrato	Raíz	Humedad aprovechable (%)	Agua de riego	Tratamientos
Tezontle	Dividida	80-80	SN	T1
		80-30	SN	T2
	Completa	80	SN	T3
		50	SN	T4
Composta	Dividida	80-80	Agua acidulada-SN	T5
		80-30	Agua acidulada-SN	T6
	Completa	80	Agua acidulada-SN	T7
		50	Agua acidulada-SN	T8

SN = Solución Nutritiva

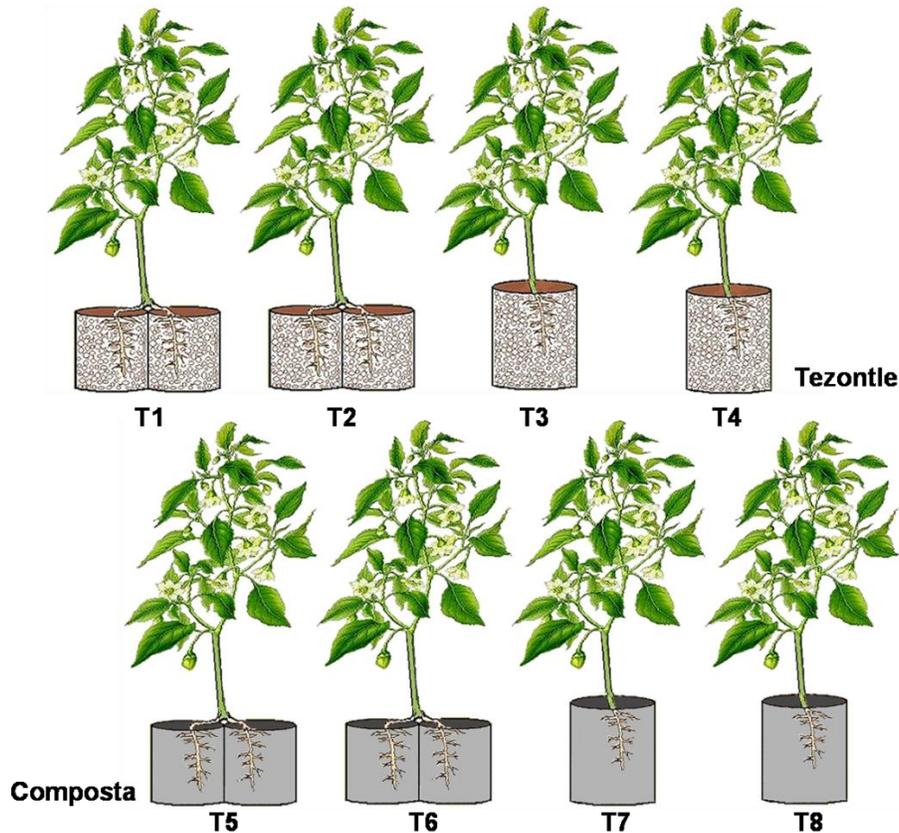


Figura 4.6. Tratamientos en estudio

Los niveles de HAR fijados fueron obtenidos de la relación entre lecturas de humedad del sustrato y contenido de humedad conocidos.

4.7 Manejo del experimento

4.7.1 Medición del contenido de humedad y aplicación de los tratamientos de HAR en el sustrato

Durante el periodo experimental se midió el contenido de agua volumétrico (Θ_v) del sustrato, utilizando un reflectómetro de tiempo denominado TDR (HH2 Moisture Meter, Wet sensor type WET-2, Δ -T Devices Ltd, Cambridge, UK). En este sistema el Θ_v se deriva indirectamente de la medición del tiempo que tarda en viajar un pulso de energía electromagnética en el suelo ó sustrato (Parchomchuk *et al.*, 1997). El procedimiento de medición consistió en dividir el recipiente que contenía el sustrato en tres estratos de muestreo denominados A, B y C (Figura 4.7), y con ayuda del TDR se obtuvo de forma puntual la humedad volumétrica en la cual se estaba desarrollando el sistema radical en cada estrato del recipiente, de esta manera se logró monitorear de forma indirecta el crecimiento de las raíces al observar los valores de consumo de agua de éstas por estrato. Este procedimiento se realizó con el objetivo de muestrear todo el medio de exploración de las raíces ya que el crecimiento y distribución de éstas varía de acuerdo con los diferentes niveles de humedad del sustrato existente y por las propiedades físicas de cada sustrato evaluado.



Figura 4.7. Procedimiento en la toma de la lectura del Θ_v con el TDR en tres estratos del recipiente para todos los tratamientos evaluados

Cada valor de Θ_v (tres repeticiones) obtenido con el TDR, se corrigió con la fórmula de calibración encontrada para cada sustrato; obteniéndose así, el Θ_v por

estrato del sustrato medido. Posteriormente este valor de humedad se comparó con los valores de CC y PMP del sustrato para conocer el porcentaje de HAR en el que se encontraba en ese momento el sustrato; una vez conocido el valor de HAR por estrato, se realizó un promedio de los tres estratos (A, B y C) por recipiente para obtener el porcentaje de HAR general al que se encontraba creciendo las raíces. Al conocer el θ_v consumido y el volumen de sustrato por estrato se obtuvo la cantidad de agua (mL) necesaria para llevar al sustrato a CC nuevamente (100 % humedad aprovechable), la cual se midió con una probeta graduada de 1000 mL (Figura 4.8). El θ_v a CC y PMP en tezontle fue de 15 y 6 %, respectivamente, mientras que, en composta fue de 55.4 y 37.6 % para las mismas constantes de humedad.



Figura 4.8. Medición de la cantidad de agua (mL) aplicada al sustrato para llevarlo nuevamente a capacidad de campo (100 % HAR)

Para establecer los tratamientos de HAR a evaluar durante el periodo experimental, se estimó diariamente el contenido de humedad del sustrato mediante mediciones en tres plantas por tratamiento, seleccionadas en forma aleatoria a lo largo de la hilera de plantas del mismo tratamiento. El concepto de secado parcial de la raíz involucra aplicar agua a la mitad del sistema radical mientras que la otra mitad es expuesta a un abatimiento de la humedad del suelo previamente establecido. Al siguiente turno (15 días después), el riego se alterna hacia la parte de la raíz (suelo) que se dejó secar y así sucesivamente durante el desarrollo del cultivo (Stoll *et al.*, 2000). Este fue el caso durante el proceso de esta investigación para los tratamientos SPR80-30 que tuvieron ciclos de alternancia de 15 días (Figura 4.9A y B). Para las plantas de los demás tratamientos evaluados, SPR80-80, testigo 80 y

testigo 50, durante todo el periodo experimental, sus raíces crecieron a un nivel de HAR \geq de 80, 80 y 50 %, respectivamente (Figura 4.9C, D, E y F).

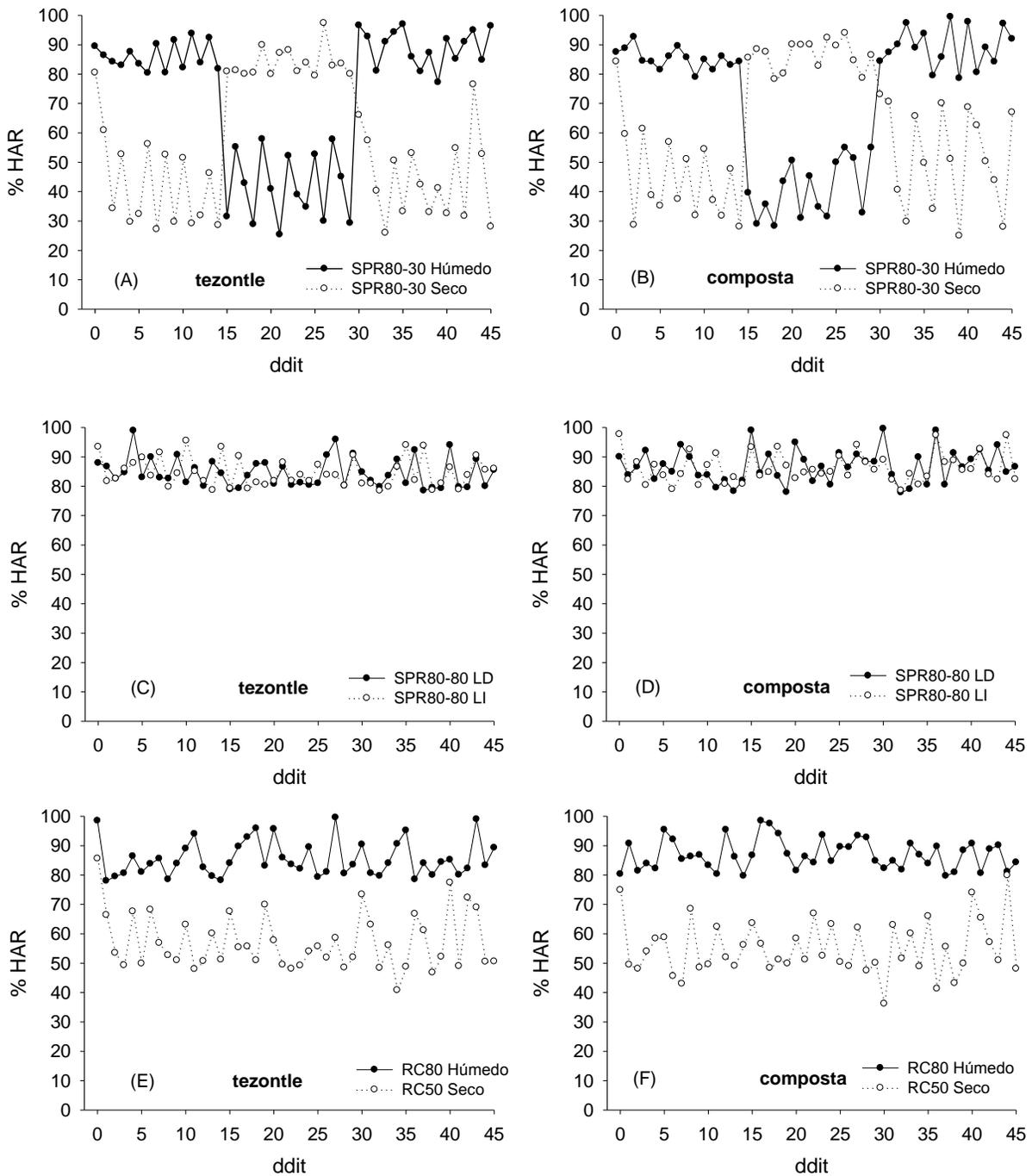


Figura 4.9. Comportamiento de la humedad aprovechable residual (HAR) de los tratamientos evaluados bajo tezontle y composta, durante el periodo experimental (1-45 días después de iniciados los tratamientos “ddit”)

En forma general, según las condiciones ambientales existentes a los tratamientos húmedos (80 % HAR) se les proporcionó de 3 a 4 riegos por día para mantener en 80% HAR el medio de crecimiento de las plantas; mientras que, a los tratamientos secos (30 y 50 % HAR) se les dio un riego cada 2 días para mantener a las plantas en condiciones deficitarias de humedad.

4.7.2 Riegos

El riego se realizó por goteo a cada planta mediante dos emisores colocado sobre cada uno de los dos compartimentos con raíz en las plantas bajo SPR y dos emisores en las plantas con el sistema radical completo (testigo); los emisores se colocaron cerca del tallo con un gasto de 4 y 8 L h⁻¹ para plantas bajo SPR y testigo, respectivamente. Al inicio, las plantas en ambos sustratos se regaron a capacidad de campo, para permitir el establecimiento de las raíces.

4.7.2.1 Riego y fertilización de las plantas en el sustrato de tezontle

Diez días después del trasplante y hasta un día antes de iniciar los tratamientos (44 ddt), las plantas se regaron con la solución nutritiva de Steiner (1984) a un potencial osmótico de -0.036 MPa. A partir del inicio de los tratamientos (28 de mayo) y hasta el fin del experimento (12 de julio), las plantas se regaron con la solución nutritiva de Steiner (1984) con un potencial osmótico de -0.072 MPa aplicada continuamente con el agua de riego (Cuadro 4.2 y Figura 4.10).

4.7.2.2 Riego y fertilización de las plantas en el sustrato de composta

Para el riego de las plantas crecidas en composta se instaló un sistema de riego (Figura 4.10) separado al utilizado para el riego de las plantas crecidas en tezontle, ya que las plantas en el sustrato inerte (tezontle) se regaron durante todo el periodo



Figura 4.10. Riego y fertilización

experimental con solución nutritiva; mientras que, las plantas en composta se regaron inicialmente con agua acidulada por poseer los nutrimentos necesarios para el crecimiento temprano de las plantas de pimiento morrón. A los 76 ddt (29 de junio) se empezó a suministrar solución nutritiva a un potencial osmótico de -0.036 MPa, debido ha que el suministro de nutrimentos contenidos en la composta fue menor a la demanda del cultivo. Lo anterior se sustenta por los síntomas de deficiencias nutrimentales presentes en las hojas de las plantas bajo estudio (Figura 4.11).



Figura 4.11. Síntomas de deficiencias nutrimentales en plantas crecidas en composta

La solución nutritiva se preparó con fertilizantes comerciales constituidos por: $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, KNO_3 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, K_2SO_4 , H_3PO_4 y H_2SO_4 , ajustándose el pH a 5.5. En la solución, las concentraciones de los micronutrimentos (mg L^{-1}) fueron de: Fe^{2+} (2.0); B (0.6); Mn^{2+} (2.3); Zn^{2+} (0.6) y Cu^{2+} (0.06).

Cuadro 4.2. Composición química de la solución nutritiva Steiner (1984)

Solución nutritiva	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	NO_3^-	H_2PO_4^-	SO_4^{2-}	PO*
	me L^{-1}						
Steiner	9	7	4	12	1	7	-0.072

*PO. Potencial osmótico (MPa)

4.7.3 Prácticas culturales

Las plantas durante el crecimiento se dirigieron a dos tallos y se realizaron podas de hojas senescentes y yemas vegetativas axilares cada 8 d para mantenerlas en óptimas condiciones.

Al inicio del amarre del primer fruto las plantas fueron sostenidas con hilo rafia atado a alambres colocados en la parte superior y a lo largo de la hilera de plantas. Desde la antesis de las primeras flores (03 de mayo del 2010), las plantas se movieron para favorecer la polinización aproximadamente a las 13:00 h de cada día. La prevención y/o control de plagas y enfermedades (como gusanos del fruto, mosquita blanca, pudriciones radicales y cenicilla) se realizó aplicando aspersiones de productos químicos (Cuadro 4.3); algunos aplicados a través del sistema de riego por goteo. Además de aspersiones semanales del fertilizante foliar BAYFOLAN®FORTE a una dosis de 2 mL L⁻¹ de agua.

Cuadro 4.3. Calendario de aplicación de fungicidas e insecticidas y control de malezas en el cultivo de pimiento morrón

Problema	Producto		Dosis (L ó kg ha ⁻¹)	Días al trasplante
	Nombre comercial	Nombre químico		
Enfermedad				
Damping off (<i>Fusarium</i> spp., <i>Phythium</i> spp., <i>Phytophthora</i> spp. y <i>Sclerotium</i> spp.)	PREVICUR® 72.2 %	propamocarb HCL	0.45-0.60	1, 26, 58
	COBREZATE® 200	oxicloruro de cobre	0.50-1.00	26, 43
Tizones (<i>Phytophthora infestans</i> , <i>Alternaria solani</i>)	RIDOMIL GOLD BRAVO® 76.5 PH	metalaxil + clorotalonil	0.75-1.00	51, 63, 72
Cenicilla (<i>Leveillulla taurica</i> - <i>Oidiopsis</i> spp.)	BAYLETON® 25% WP	triadimefon	0.20-0.40	43
	BENOMYL® 50% WP	benomil	0.50-1.00	63, 72
	AMISTAR® 50 WG	azoxystrobin	0.20-0.40	78
Plaga				
Gusano del fruto (<i>Spodoptera</i> spp., <i>Heliothis</i> spp.)	KARATE ZEON® 5 %	lambdacihalotrina	0.15-0.20	30, 63
mosquita blanca (<i>Bemisia tabaci</i>)	PLENUM® 50 GS	pymetrozine	0.20-0.40	30
Control de malezas				10, 19, 40

Nota: el control de malezas sólo se realizó en los recipientes con composta como sustrato

4.8 Factores ambientales

Las variables ambientales que se registraron con un sistema automatizado HOBOWare® Pro (Onset Computer Corporation, Data Loggers & Devices) a partir de iniciados los tratamientos (28 de mayo) hasta el fin del experimento (13 de julio), fueron la temperatura del ambiente (°C) y la humedad relativa (%), las cuales se

midieron dentro del invernadero cada hora. Con los valores de la humedad relativa y la temperatura del ambiente se calculó el déficit de presión de vapor (DPV).

4.9 Variables a evaluar

Para cumplir con los objetivos planteados, se evaluaron las siguientes variables:

4.9.1 Relaciones hídricas

El potencial de agua total de la hoja (Ψ_{hoja}) se determinó en la hoja más joven y completamente expandida de cuatro plantas por tratamiento, con una bomba de presión tipo Scholander (Soil Moisture Equipment Corp., Santa Bárbara, California, USA). Para ello la hoja se separó de la planta e inmediatamente se introdujo en la cámara de medición de presión, dejando un segmento de peciolo fuera, posteriormente se aplicó lentamente presión neumática, generada con gas nitrógeno, hasta observarse en el corte del peciolo fuera de la cámara, la primera gota de savia de los haces vasculares, indicando el balance de presión. En ese momento se tomó la lectura del manómetro y se expresó en MPa. Las determinaciones se realizaron a los 15, 30 y 45 días después de iniciados los tratamientos (ddit) en dos periodos de tiempo; en ausencia de luz solar (7:00 h) y, entre las 12:00 y 13:00 h.

4.9.2 Intercambio de gases

La tasa de asimilación de CO_2 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (A), la conductancia estomática (g_s) ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y la tasa transpiratoria (E) ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) se midieron en 2.5 cm^2 de área foliar en la hoja más joven y completamente expandida de cuatro plantas por tratamiento, entre las 13:00 y 13:30 h, las medidas se realizaron *in situ* a los 15, 30 y 45 ddit con un sistema abierto y portátil de análisis de gases en el espectro infrarrojo (CIRAS-1, PP-SYSTEMS). Las lecturas se tomaron cuando el flujo de CO_2 era estable en 360 ppm dentro de la cámara de medición. La temperatura promedio en la cámara de medición durante el primer, segundo y tercer muestreo fue de 25.5, 26.4 y 24.2 °C, respectivamente. La radiación fotosintéticamente activa varió desde 574 a 839, 573 a 729 y 152 a 384 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, durante la primera y la última medición en el

primer, segundo y tercer muestreo, respectivamente. La determinación del intercambio gaseoso se hizo en hojas vecinas a las usadas en la estimación del Ψ_{hoja} .

4.9.3 Área foliar, distribución de la materia fresca y seca en hoja, tallo, raíz y fruto y, rendimiento

A los 15, 30 y 45 días después de iniciados los tratamientos (ddit), cuatro plantas por tratamiento fueron cortadas desde el cuello de la raíz y se separaron en sus diferentes órganos (raíz, tallo, hoja y fruto), para conocer la distribución de la materia fresca, éstos se pesaron en una balanza electrónica con precisión de 1.0 g marca Esnova modelo TH-11. A las hojas desprendidas se les determinó su área foliar con un integrador de área foliar (LI-COR, Inc. Lincoln, Nebraska USA, Modelo LI-3100) expresándose en m^2 por planta. Para conocer la materia seca de los diferentes órganos, éstos se secaron en una estufa con aire forzado a 70 °C hasta peso constante y se pesaron en una balanza electrónica. El rendimiento por planta se cálculo con el peso fresco de los frutos de cada muestreo realizado.

4.9.4 Calidad del fruto

La cosecha de los frutos se realizó al alcanzar su madurez fisiológica seleccionándose cuatro frutos por tratamiento y se les determinó su firmeza (Newton) y contenido de sólidos solubles ($^{\circ}\text{Brix}$), a los 45 ddit. La firmeza de cada fruto se determinó en dos sitios opuestos de la parte media de cada fruto con un penetrómetro equipado con un puntal cónico de 0.8 mm de diámetro con escala de 0.1 hasta 32 % de fuerza. Los sólidos solubles totales se determinaron con un refractómetro digital, marca ATAGO, con escala de 0 hasta 32 %, siguiendo la metodología propuesta por la AOAC (1990).

4.9.5 Eficiencia en el uso del agua (EUA)

La EUA se calculó con base en la producción de materia fresca y seca del fruto y total por planta y el agua evapotranspirada, de acuerdo con la siguiente igualdad:

$$EUA = \frac{\text{Gramos de materia fresca de fruto ó total por planta}}{\text{gramo de agua evapotranspirada}}$$

A nivel de hoja, la eficiencia en el uso del agua instantánea (EUA_i) se estimó con las mediciones de intercambio de gases y se calculó como la proporción de la tasa de asimilación de carbono entre la tasa transpiratoria (A/E).

4.10 Análisis estadístico

A todas las variables evaluadas se les realizó un análisis de varianza de acuerdo al diseño experimental completamente al azar con arreglo en parcelas divididas con el procedimiento GLM del paquete estadístico SAS versión 9.1 (2002-2003) (SAS Institute, NC, EE. UU.) y prueba de comparación de medias Tukey con un nivel de significancia del 5 % para determinar diferencias significativas entre tratamientos. La representación gráfica de los datos se realizó con el programa SigmaPlot de Jandel Scientific (2001, versión 7.1)

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Caracterización física de los sustratos

Los resultados de la caracterización física de los sustratos utilizados se presentan en el Cuadro 5.1, donde se observan diferencias marcadas entre los mismos. En tezontle la densidad aparente (1.12 g cm^{-3}) fue mayor en comparación a la de composta con 0.79 g cm^{-3} , consistente con lo reportado por Abad y Noguera (1998), quienes mencionan que las densidades más bajas corresponden a los sustratos orgánicos. Es muy importante considerar este parámetro pues tiene influencia en el desarrollo y penetración de las raíces de las plantas. Al respecto, en varias investigaciones se ha encontrado que, conforme se incrementa la densidad aparente en el suelo, la penetración de las raíces disminuye siendo más notorio por arriba de 1.3 g cm^{-3} para la mayoría de las plantas (Flocker *et al.*, 1960; Tackett y Pearson, 1964). En esta investigación, los valores de densidad aparente encontrados no influyeron negativamente en la penetración de las raíces de las plantas de pimiento morrón ya que fueron menores a los niveles críticos reportados por los investigadores antes mencionados. Otro de los aspectos importantes de la densidad aparente es que, si la finalidad del sustrato es para producción de plantas en maceta se recomienda que tenga valores superiores a 0.5 g cm^{-3} (Abad, 1995) para evitar que sean fácilmente volteadas por el viento o por el mismo peso de la planta. Resultados similares fueron encontrados por Raviv *et al.* (2002) y Vargas (2007), quienes reportaron valores de 0.8 a 1.5 g cm^{-3} en tezontles de Israel y México.

Cuadro 5.1. Caracterización física de ambos sustratos evaluados

Sustrato	Da	Dr	pH	C.E.	EPT	CA	CRA	Curva de liberación de agua		
	g cm^{-3}							dS m^{-1}	% Humedad volumétrica	
								AFD	AR	ADD
Tezontle	1.12	2.71	7.05	0.21	33.2	19.2	14.1	5.9	2.2	6.0
Composta	0.79	2.11	7.81	5.24	77.7	9.3	68.5	12.5	11.0	45.0

Da=Densidad aparente, Dr=Densidad real, C.E.=Conductividad eléctrica, EPT=Espacio poroso total, CA=Capacidad de aireación, CRA=Capacidad de retención de agua, AFD=Agua fácilmente disponible ó aprovechable, AR=Agua de reserva y, ADD=Agua difícilmente disponible

En cuanto a la densidad real (Dr) o de partículas, los resultados fueron de 2.1 y 2.7 g cm^{-3} para composta y tezontle, respectivamente (Cuadro 5.1). Este valor

depende del material y, a diferencia de la densidad aparente, es independiente del grado de compactación y del tamaño de partículas (Ansorena, 1994). En la presente investigación, los valores encontrados de D_r en ambos sustratos se pueden considerar dentro del rango óptimo (1.45 a 2.65 g cm⁻³) para sustratos según Abad *et al.* (1993). Resultados similares han sido encontrados por varios investigadores (Chen *et al.*, 1980; Vargas, 2007).

Como ya se ha mencionado, el espacio poroso total (EPT) en un sustrato, es el volumen total no ocupado por la fase sólida, es decir, la parte que no está conformada por las partículas orgánicas ni minerales (Martínez, 1992). El valor del EPT (Cuadro 5.1) en composta fue dos veces mayor (77.7 % con base a volumen) al encontrado en tezontle (33.2 %), el cual se correlacionó con la menor densidad aparente encontrada para este sustrato (composta), como la encontrada por Vargas (2007) en tezontle ($r = 0.997$). Al observar el rango óptimo (60 a 80 %) para sustratos según Raviv *et al.* (2002), sólo el valor del EPT de la composta estuvo dentro de éste. Es importante mencionar que un alto EPT no implica necesariamente un sustrato con buena estructura, sino que es necesario conocer la relación entre la fracción de la porosidad que se encarga de alojar el agua después del riego y la fracción que es drenada después de este y que es la que proporciona la aireación al sistema radical del cultivo (Abad y Noguera, 2000). Al respecto, en la relación agua/aire se tiene que para la capacidad de aireación (CA) (Cuadro 5.1) sólo el tezontle estuvo dentro del rango óptimo (10 a 30 % en volumen) con 19.2 % (Abad *et al.*, 1993); mientras que, la CA en composta estuvo por debajo del límite inferior con 9.3 %. Lo anterior, junto con la disponibilidad de agua son factores clave en el buen desarrollo del sistema radical y por ende en un adecuado suministro de agua y nutrimentos hacia la parte aérea de las plantas como reportado por varios investigadores (Russell y Russell, 1968), quienes indican que bajo condiciones de un suelo bien aireado, el sistema radical crece vigorosamente y desarrolla un gran sistema ramificado de raicillas, que son las responsables de la absorción activa de agua y nutrimentos. A medida que disminuye la aireación en el medio, estos pelos radicales mueren rápidamente o son incapaces de desarrollarse, dejando un sistema de raíces poco ramificadas, gruesas y cortas. En lo que se refiere a la capacidad de

retención de agua (CRA), la composta obtuvo el mayor valor (68.5 %), mientras que, en tezontle este parámetro representó sólo el 14.1 %, valores similares a lo reportado por Prasad y Ni Chualáin (2004), quienes mencionaron que la CRA se aumenta a medida que disminuye el tamaño de las partículas que conforman el sustrato encontrando correlaciones altas para polvo de coco y composta ($R^2 = 0.94$ y 0.98 , respectivamente). Sin embargo, es importante remarcar que la fuerza de succión que deberá ejercer la planta para extraer el agua retenida por el sustrato será mayor cuanto menores sean los poros: si se reduce diez veces el diámetro de los poros, la energía necesaria para extraer un volumen determinado de agua se multiplica por diez.

En la Figura 5.1, se presenta la curva de liberación de agua de ambos sustratos, donde se observa que el tezontle pierde la mayor parte del agua a tensiones muy bajas, inferiores a 50 cm de c. a. (-0.05 MPa), mientras que, en composta la pérdida de agua es menos drástica reteniendo un volumen mayor de agua por encima de los 100 cm de c.a. (-0.10 MPa), es decir, aún cuando la composta retiene una mayor cantidad de agua en comparación al tezontle, ésta se encuentra retenida mayormente por la matriz del suelo, lo que provoca que las raíces realicen un mayor trabajo para extraerla, además de limitar la aireación del material. Mientras que, en tezontle la mayor cantidad del agua retenida se encuentra más disponible (a menores tensiones) originando que las raíces realicen un menor esfuerzo para el aprovechamiento de la misma.

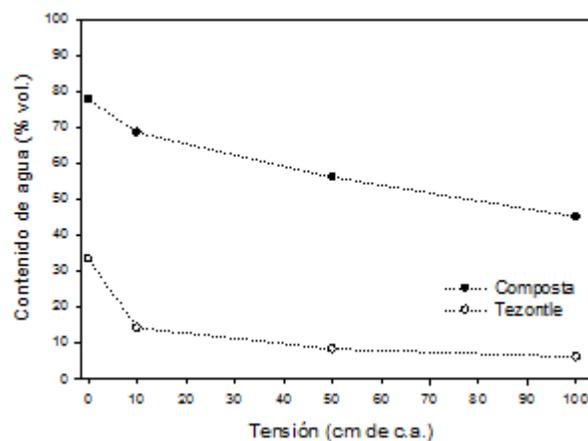


Figura 5.1. Curva de liberación de humedad en ambos sustratos evaluados

En la Figura 5.2, se muestra la distribución de agua y aire en la curva de liberación de agua de ambos sustratos en el intervalo de 0 a 100 cm de succión. En ella se observa cómo el agua se libera drásticamente en tezontle al aplicar tensiones bajas y, lentamente en composta a medida que aumenta la tensión aplicada en el sustrato. El área bajo la curva representa el volumen de aire y va aumentando a medida que sale el agua. El área sobre la curva representa el volumen de agua y se ve cómo va disminuyendo a medida que aumenta la tensión. Se representa también el porcentaje en volumen de la materia sólida (M.S.) del sustrato que es constante, siendo mayor en tezontle (66.8 %) en comparación al 22.3 % de material sólido de la composta y, el espacio poroso total (EPT) que puede estar ocupado por aire y/o agua. En cuanto al agua fácilmente disponible (AFD) (Cuadro 5.1) encontramos valores inferiores al rango considerado como óptimo según Abad *et al.* (1993) con un intervalo de 20 a 30 % en volumen, sin embargo, estos resultados son similares a los reportados por varios investigadores (Chen *et al.*, 1980; Wallach *et al.*, 1992). Para el agua de reserva (AR) (Figura 5.2), sólo la composta estuvo dentro del rango óptimo según Abad *et al.* (1993) (4 a 10 % en volumen). Mientras que, en tezontle el AR fue de 2.2 %, similar a lo encontrado por Chen *et al.* (1980), quienes reportaron 2.0 % de AR para tezontle rojo. Finalmente, el agua difícilmente disponible (ADD) (Figura 5.2) fue mayor en composta (45.0 %) en comparación a 6.0 % obtenido en tezontle, valor similar al reportado por Vargas (2007) en tezontle.

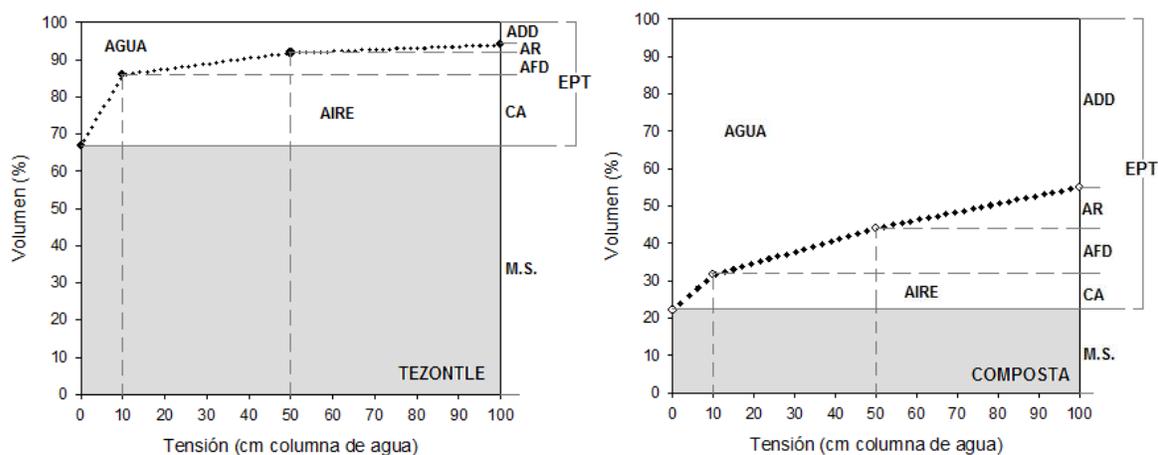


Figura 5.2. Distribución de agua y aire en la curva de liberación de humedad. M.S.=materia sólida, CA=capacidad de aireación, AFD=agua fácilmente disponible, AR=agua de reserva, ADD=agua difícilmente disponible y EPT=espacio poroso total

En lo que se refiere al pH (Cuadro 5.1), su valor fue de 7.05 y 7.81 (cerca de la neutralidad) para tezontle y composta respectivamente, siendo ligeramente superiores a los considerados como óptimos por la North Carolina State University (NCSU, 2004) con un rango de 5.5 a 7.0. La conductividad eléctrica (Cuadro 5.1) encontrada fue de 0.21 y 5.24 dS m⁻¹ en tezontle y composta, respectivamente, valores similares a los reportados por NCSU (2004) para sustratos de cultivo y, ha los encontrados por Vargas (2007) en varias muestras de tezontles. Este último parámetro (C.E.) nos da una idea general de la cantidad de iones presentes en los sustratos, observando que la composta contiene una gran cantidad de sales, que pudieran ser suficientes para cubrir las demandas nutrimentales del pimiento morrón durante los primeros meses después del trasplante como lo reportado por varios investigadores (Raviv *et al.*, 2004; Márquez y Cano, 2005; Raviv *et al.*, 2005), quienes han encontrado que los nutrimentos presentes en la composta satisfacen los requerimientos del tomate durante los primeros 2 a 4 meses después del trasplante e incluso hasta tener producciones aceptables en tomate cherry. No siendo así, para el tezontle que necesita el suministro de nutrimentos para el crecimiento adecuado y desarrollo de las plantas.

5.2 Calibración de las lecturas del TDR (θ_v)

En la Figura 5.3, se ilustra la relación entre la humedad volumétrica calculada y la humedad volumétrica determinada con el TDR. La relación entre ambas mediciones resultó lineal en ambos sustratos obteniendo las siguientes ecuaciones de calibración: $\theta_v = 1.058x - 3.166$ para tezontle y $\theta_v = 1.132x$ para composta.

Sin embargo, los valores obtenidos con el TDR en tezontle fueron superiores a los valores de humedad calculados con el producto humedad gravimétrica por densidad aparente, es decir, el TDR sobreestimó los valores de θ_v presentes en las muestras de tezontle; mientras que, en composta esta relación se invirtió pues los valores obtenidos con el TDR subestimaron los valores de θ_v presentes en las muestras del sustrato. El análisis de correlación mostró una asociación muy alta entre estas variables, de acuerdo con los valores de r obtenidos para tezontle ($r =$

0.997) y composta (0.996), lo que indica que aumentos en el θ_v en ambos sustratos aumentan los valores de las lecturas del TDR.

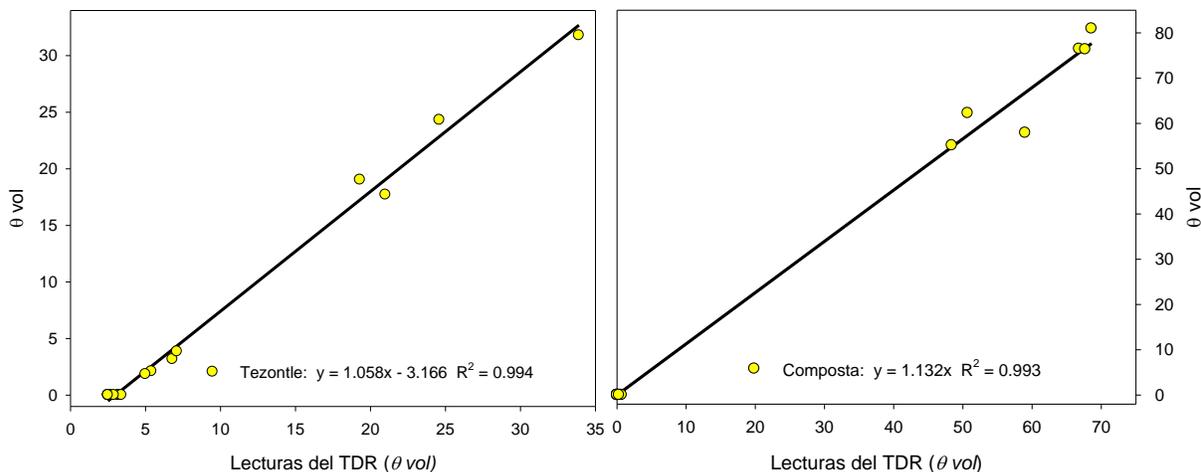


Figura 5.3. Relación entre el contenido volumétrico de humedad (θ vol) calculado por gravimetría y la densidad aparente de cada sustrato (tezontle y composta) y el contenido volumétrico medido con el TDR

Las ecuaciones de predicción arrojadas por el análisis de regresión resultaron con valores de R^2 ajustado altos para ambos sustratos. Esto indica que los cambios en la humedad volumétrica obtenida con el TDR están determinados en un 99.4 % por cambios en la humedad volumétrica presente en el sustrato, dejando sólo el 0.6 % a cambios debido a otros factores como la salinidad en el sustrato. Resultados similares han sido reportados por otros investigadores (Chandler *et al.*, 2004; Murillo *et al.*, 2008). De acuerdo a lo anterior, observamos que existe un grado alto de asociación entre las lecturas del TDR y el contenido volumétrico de humedad de los sustratos, comprobando que esta técnica constituye un procedimiento práctico y rápido para la estimación de la humedad volumétrica, sin embargo, requiere de la calibración previa para obtener lecturas más confiables para cada sustrato en particular.

5.3 Factores ambientales

Durante el periodo experimental, la temperatura del aire, humedad relativa y el déficit de presión de vapor (DPV) fluctuaron (Figura 5.4 y Cuadro 1-A del apéndice).

El mayor DPV se presentó durante los primeros 15 d de inicio de los tratamientos (primer periodo de muestreo) alcanzando los valores promedio más altos entre las 12:00 y 16:00 h que variaron de 6.08 a 7.64 kPa, originado por las temperaturas más altas (41.0-43.1 °C) y los valores de humedad relativa más bajos (16.4-22.4 %) que se registraron durante este periodo. En los dos periodos de muestreo subsecuentes el DPV disminuyó hasta 4.25 kPa en la hora de mayor demanda evaporativa, debido a una incidencia menor de radiación solar ocasionada por la presencia de un número mayor de días nublados ya que coincidió con el periodo de lluvias de la región, lo que provocó una disminución de la temperatura promedio de 42.2 a 35.5 °C en el segundo y tercer periodo de muestreo, respectivamente y, aumentos en la humedad relativa de 22.0 a 33.5 %. La menor temperatura y mayor humedad relativa promedio variaron de 10.6 a 13.4 °C y 82.2 a 86.3 %, respectivamente, durante el periodo experimental y se registraron a las 7:00 h del día, las cuales provocaron el menor DPV con valores promedio de 0.23, 0.21 y 0.21 kPa en el primer, segundo y tercer periodo de muestreo, respectivamente.

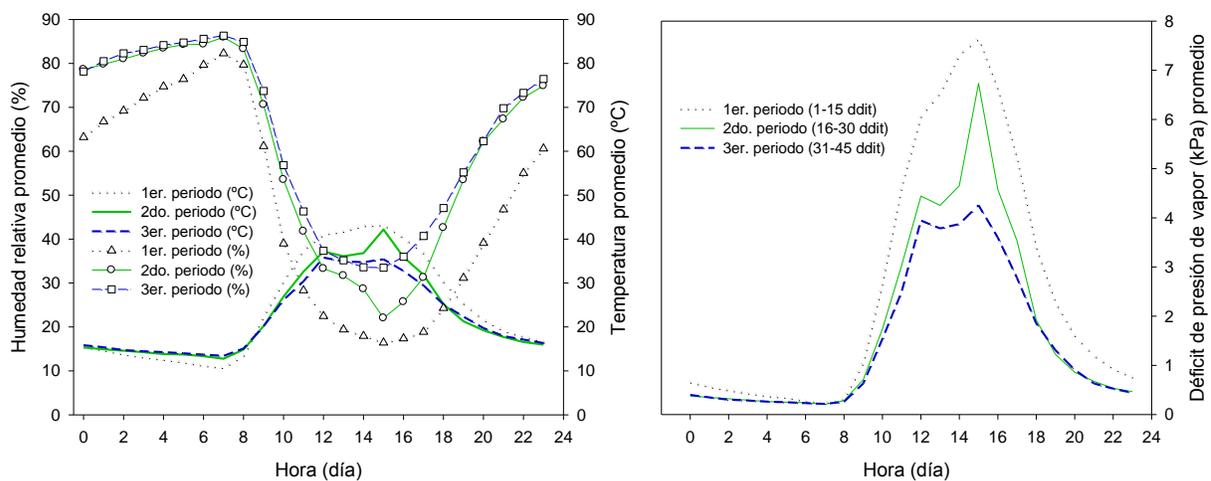


Figura 5.4. Factores ambientales incidentes durante el periodo experimental divididos en tres periodos de muestreo: primer (28 de mayo al 12 de junio) segundo (13 al 28 de junio) y tercer (29 de junio al 12 de julio) periodo

En general se observa que los primeros 30 d de iniciados los tratamientos (ddit), la atmósfera fue más demandante de humedad al presentar los DPV más altos, lo que ayudaría a potencializar la sensibilidad del estoma sin afectar el

potencial de agua del vástago. En la presente investigación, el mayor DPV en los primeros dos periodos produjo un aumento (2.52 °C) en la temperatura de la hoja en comparación con el tercer periodo obteniendo valores (°C ± desviación estándar) de 24.21±0.67, 24.99±0.75 y 22.47±0.53 para el primer, segundo y tercer periodo de muestreo, respectivamente. La amplia evidencia indica que este incremento en la temperatura de la hoja provoca una transpiración mayor, con una consecuente pérdida de agua; el aumento de la demanda evaporativa combinado con un suministro bajo de agua a las plantas (estrés hídrico) ocasionan que menos agua esté disponible a las células del estoma causando la disminución de la turgencia celular por un lado y, la alcalinización del pH del apoplasto por la concentración de solutos alrededor de las células guarda, esta alcalinización favorece la formación de la forma disociada del ABA (ABA⁻), la cual al no poder atravesar fácilmente las membranas de las células del mesófilo, se dirige en mayor cantidad al apoplasto y el exterior de las células guarda vía el torrente de transpiración, lo cual puede contribuir al aumento en la sensibilidad del estoma al ABA del xilema en respuesta a un DPV alto (Zhang y Outlaw, 2001), conduciendo al cierre parcial de los estomas y a la disminución de la tasa de crecimiento de la hoja (Cowan, 1977; Johnson y Ferrell, 1983). Sin embargo, el estoma no siempre responde al DPV y por lo tanto tampoco hay una acción directa para que se incremente la concentración de ABA en la hoja teniendo ningún efecto sobre la apertura estomática como reportado por varios investigadores (Trejo *et al.*, 1995; Wilkinson y Davies, 2002), quienes mencionan que esto se debe principalmente al traslado simplástico de gran parte de esta hormona. Lo anterior indica que no solamente el ambiente de la raíz si no también el ambiente de la hoja, tiene la capacidad para controlar la apertura estomática, vía cambios de pH (Davies *et al.*, 2002; López, 2007).

5.4 Evapotranspiración

Durante el periodo experimental el volumen evapotranspirado (L pl⁻¹) varió significativamente en respuesta a las condiciones ambientales, al sustrato y a los niveles de HAR aplicados. Al disminuir la demanda evaporativa de la atmósfera (DPV) el agua evapotranspirada por planta disminuyó considerablemente hasta en

un 23.2 y 40.2 %, en plantas en tezontle y composta, respectivamente, al comparar el consumo de agua del primer (1-15 ddit) y tercer (31-45 ddit) periodo de muestreo (Cuadro 2-A). Respecto al sustrato utilizado, las plantas en tezontle siempre consumieron significativamente mayor cantidad de agua en comparación a las plantas en composta, a los 45 ddit cada planta en tezontle consumió 47.16 L, volumen 41.9 % superior al consumido por planta en composta (Figura 5.5). La función de respuesta que modela la evapotranspiración de la planta fue lineal en ambos sustratos, donde la tasa de consumo de agua fue de 954 y 615 mL día⁻¹ en plantas crecidas en tezontle y composta, respectivamente (Figura 5.6).

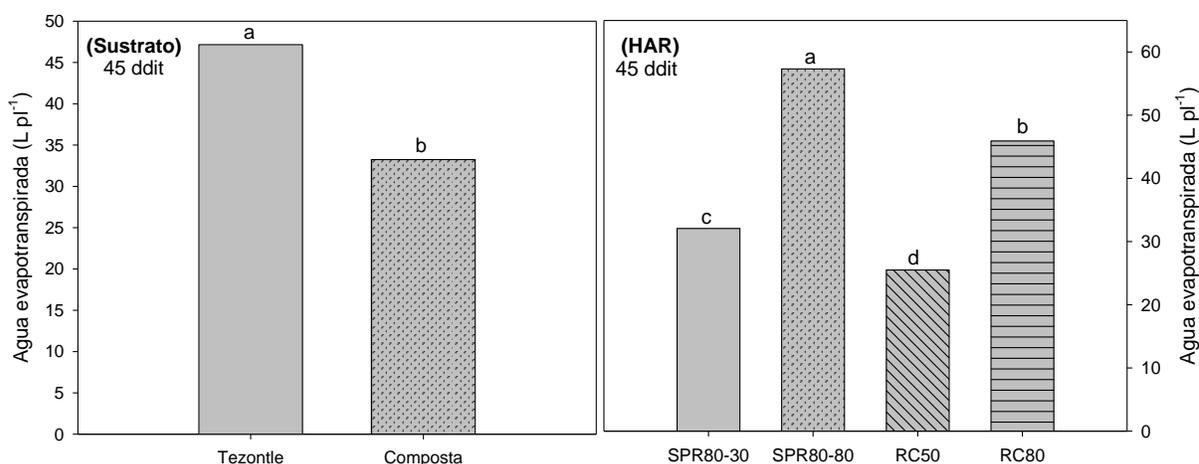


Figura 5.5. Volumen evapotranspirado (L pl⁻¹) en plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes ≥ 80 %; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes ≥ 80 % (lado húmedo) y el otro ≥ 30 % (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 80 % y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 50 %], a los 45 días de haber iniciado los tratamientos (ddit). Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$) según la prueba de Tukey

Esto se debe principalmente a las características físicas (textura y aireación principalmente) de cada sustrato, que condicionan la actividad de absorción de agua de las raíces. Al respecto, varios investigadores han reportado que los suelos de textura gruesa (suelos ligeros) permiten una mayor exploración de las raíces que

combinado con niveles adecuados de aireación aumentan y prolongan la actividad de los pelos radicales que incrementan significativamente la absorción de agua, en comparación con suelos de textura fina (suelos pesados) que al tener generalmente niveles más bajos de aireación disminuyen la formación y actividad de los pelos radicales con la consecuente menor absorción de agua (Grassi, 1975; Palacios y Martínez, 1978).

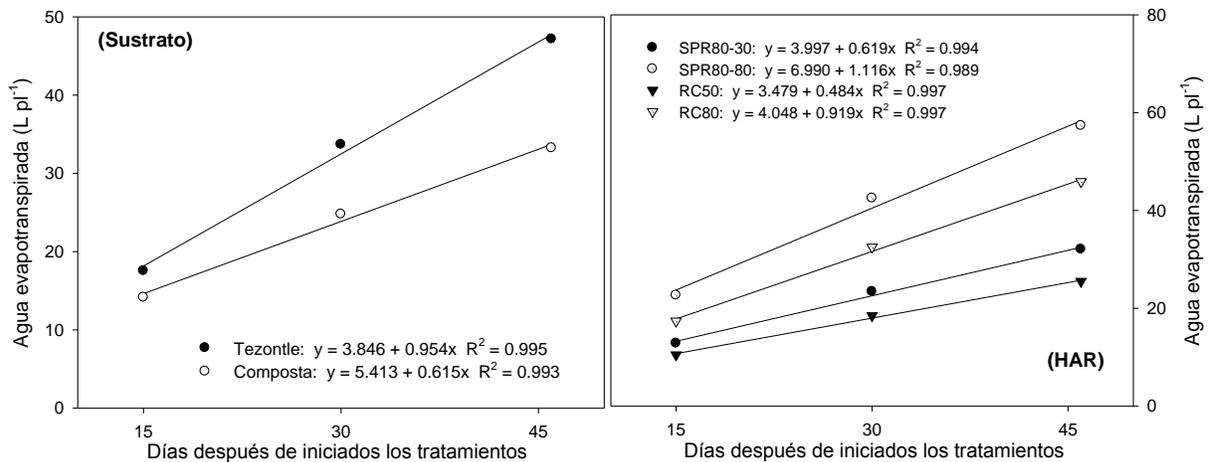


Figura 5.6. Comportamiento del volumen evapotranspirado ($L\ pl^{-1}$) en plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], durante el periodo experimental

La disponibilidad del agua en el sustrato juega también un papel primordial en el aprovechamiento rápido de ésta por las raíces como reportado por De Boedt y De Waele (1968), quienes consideran que un buen sustrato debe tener el agua disponible a un nivel energético tan bajo como sea posible y, al mismo tiempo, debe haber aire disponible suficiente en los poros de la zona radical. Al respecto, observamos que el tezontle tiene la mayor cantidad de agua retenida a tensiones muy bajas ($> -0.05\ MPa$) y un porcentaje alto de aireación (19.2 %), mientras que, en

composta la cantidad mayor de agua se encuentra retenida a tensiones por debajo de -0.10 MPa, lo que provoca una reducción de 51.6 % de la aireación en el medio en comparación al tezontle. Esto conlleva a que las raíces en tezontle se encuentren más activas y aprovechen mayor cantidad de agua al disminuir el trabajo necesario para extraerla.

Los niveles de HAR implementados influyeron en la tasa de aplicación de agua. Las plantas bajo SPR80-80 recibieron significativamente mayor cantidad de agua durante todo el periodo experimental, seguido de las plantas bajo RC80, SPR80-30 y RC50; con una aplicación de agua diaria de 1116, 919, 619 y 484 mL, respectivamente (Figura 5.6). Al final de la evaluación (45 ddit) cada planta bajo SPR80-80 evapotranspiró 57.33 L, 24.9, 78.82 y 124.82 % superior al utilizado por plantas bajo RC80, SPR80-30 y RC50, respectivamente, es decir, las plantas bajo RC80, SPR80-30 y RC50 crecieron con 11.4, 25.3 y 31.8 L pl^{-1} menor cantidad de agua que las plantas bajo SPR80-80 (Cuadro 2-A y Figura 5.5).

5.5 Relaciones hídricas (Ψ_{hoja})

La cantidad de agua aplicada por planta y las condiciones ambientales existentes durante el periodo experimental influyeron significativamente ($P \leq 0.01$) en el potencial de agua de la hoja en la mayoría de los muestreos realizados; en general, las plantas que recibieron una cantidad mayor de agua tuvieron un Ψ_{hoja} más alto en comparación a plantas estresadas medido en la mañana y al mediodía (Cuadro 3-A y Figura 5.7).

En la presente investigación, el potencial de agua de la hoja promedio medido en la mañana fue de -0.43 y -0.49 MPa en plantas crecidas en tezontle y composta, respectivamente, mientras que, el Ψ_{hoja} medido al mediodía disminuyó a -0.91 y -1.08 MPa en plantas en tezontle y composta, respectivamente (Figura 5.8). Como podemos observar, el Ψ_{hoja} promedio medido en la mañana y al mediodía fue 13.9 y 18.7 % significativamente superior en plantas crecidas en tezontle en comparación con el Ψ_{hoja} promedio de plantas en composta, durante todo el periodo experimental.

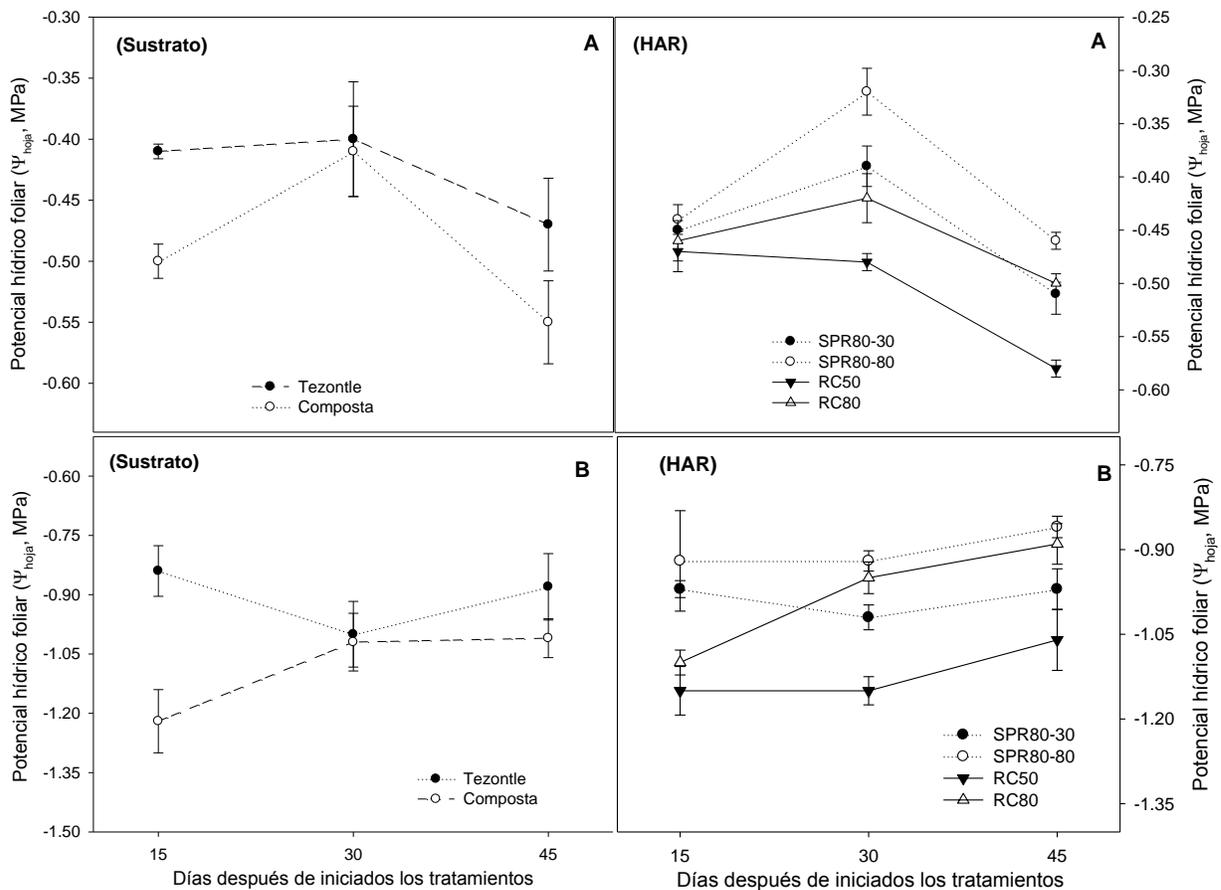


Figura 5.7. Comportamiento del potencial hídrico foliar (Ψ_{hoja}) medido en la mañana (7:00 h) (A) y al mediodía (13:00 h) (B) en plantas de pimienta morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], durante el periodo experimental

La menor diferencia entre el potencial de agua de la hoja medidos en la mañana en plantas de ambos sustratos, se debe probablemente a la menor variabilidad de los factores micro-ambientales que promueven que el potencial hídrico de la planta tienda a equilibrarse con las zonas más húmedas del suelo (Garnier y Berger, 1987; Ameglio *et al.*, 1999). Sin embargo, se observa que aún con

ese equilibrio llevado a cabo durante la noche, el Ψ_{hoja} de las plantas en composta no logró ser igual al de plantas en tezontle. Tal comportamiento es probable que se deba principalmente a la disminución significativa (41.9 %) en el consumo de agua de las plantas en composta en comparación a la cantidad de agua evapotranspirada por las plantas en tezontle, combinada con los DPV más altos (4.25-7.64 kPa) durante el periodo experimental. Estos resultados son consistentes con lo reportado por varios investigadores en diversos cultivares: pimiento (Cantore *et al.*, 2000), chile (Dorji *et al.*, 2005), tomate (Zegbe *et al.*, 2006), vid (Ferreyra *et al.*, 2007) y manzano (Zegbe *et al.*, 2007; Zegbe y Serna, 2009), quienes encontraron Ψ_{hoja} menores en plantas con estrés hídrico en comparación con plantas bien regadas.

Los niveles de HAR implementados afectaron significativamente ($P \leq 0.01$) el potencial hídrico foliar (Cuadro 3-A). El comportamiento del Ψ_{hoja} medido en la mañana a los 15 ddit fue similar entre los tratamientos lo cual indica que en esa edad de la planta (111 días después de la emergencia “dde”) todos los niveles de HAR implementados lograron equilibrar el contenido de agua de la planta con las zonas más húmedas del sustrato como sugerido por Hsiao (1990). Sin embargo, se nota una ligera disminución no significativa de 6.8 % en el Ψ_{hoja} en plantas que recibieron la menor cantidad de agua (RC50) en comparación al obtenido en plantas de mayor consumo de agua (SPR80-80). Al incrementarse la demanda evaporativa de la atmósfera originada por la radiación solar incidente durante el transcurso del día, este decremento en el Ψ_{hoja} (medido al mediodía) fue más notorio disminuyendo significativamente en un 25.0 % en comparación al de plantas bajo SPR80-80, es decir, el contenido de agua en el sustrato durante los periodos de menor demanda evapotranspirativa cubrió las necesidades hídricas de las plantas de todos los tratamientos, no siendo así para los periodos de mayor demanda de agua en plantas bajo RC50 principalmente, pues claramente se nota que el agua disponible en el sustrato no fue suficiente para satisfacer las necesidades hídricas de las plantas provocando una disminución más drástica en el Ψ_{hoja} (Figura 5.7). Durante los dos muestreos posteriores (30 y 45 ddit), el Ψ_{hoja} en plantas que recibieron una cantidad

menor de agua (RC50) tuvo una disminución altamente significativa en comparación a los otros niveles de HAR (Cuadro 3-A).

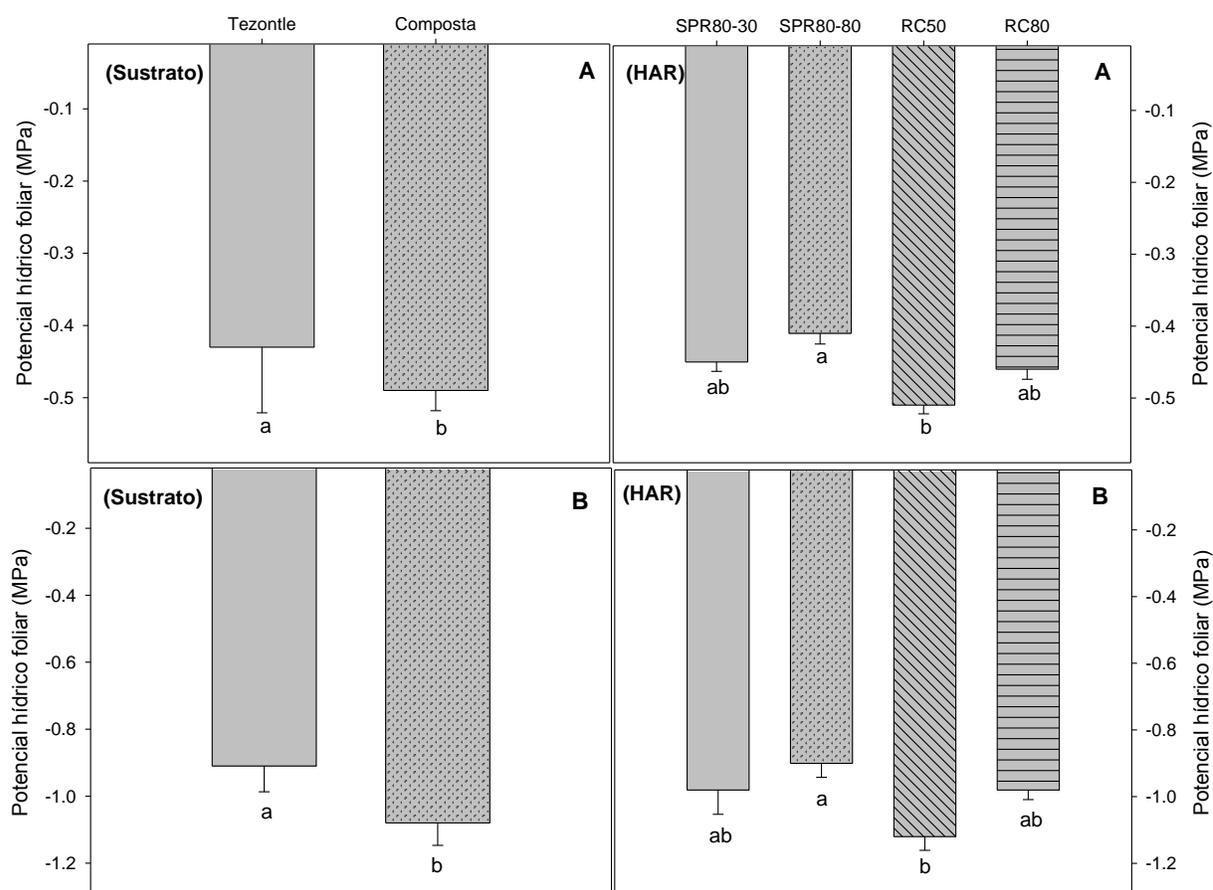


Figura 5.8. Potencial hídrico foliar (Ψ_{hoja}) promedio medido en la mañana (7:00 h) (A) y al mediodía (13:00 h) (B) en plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], durante el periodo experimental. Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$) según la prueba de Tukey

Lo anterior se debe a la coincidencia con el periodo de mayor formación y crecimiento activo de los frutos como reportado por Dorji *et al.* (2005) y Zegbe *et al.*

(2006), quienes concluyeron que esta disminución en el Ψ_{hoja} puede deberse a dos tipos de demanda por agua: una, asociada con la elongación del fruto y otra, debido a la atmósfera (DPV). Al respecto, Katerji *et al.* (1993) y Mingo *et al.* (2003) mencionan que los frutos son altamente demandantes de agua, la que resulta indispensable para sostener el potencial hídrico de las células en expansión y generar así la presión de turgencia requerida para el crecimiento. Así, la competencia por agua entre los frutos en desarrollo, aunada a la demanda evaporativa debido a un alto DPV durante el transcurso del día y, al suministro limitado de agua (Tardieu y Davies, 1993; Auge y Moore, 2002), pueden haber sido las causas que condujeron a la disminución en el potencial hídrico foliar de las plantas en este nivel de HAR (RC50).

En general, los niveles de HAR con mayor aplicación de agua originaron significativamente ($P \leq 0.01$) los Ψ_{hoja} más altos medidos en la mañana y al mediodía. El potencial hídrico foliar en la mañana (MPa \pm desviación estándar) fue, en promedio, de: -0.41 ± 0.015 , -0.45 ± 0.013 , -0.46 ± 0.014 y -0.51 ± 0.012 para los niveles de HAR SPR80-80, SPR80-30, RC80 y RC50, respectivamente, durante el periodo experimental. El potencial hídrico foliar al mediodía tuvo este mismo comportamiento aunque con valores menores, el cual fue en promedio, de: -0.90 ± 0.042 , -0.98 ± 0.073 , -0.98 ± 0.029 y -1.12 ± 0.041 MPa, para el mismo orden de los niveles de HAR arriba mencionados (Figura 5.8). Uno de los beneficios del secado parcial de la raíz en la fisiología de la planta es mantener (sin alteraciones significativas) el estatus hídrico de la hoja similar al de plantas cuyo sistema radical ha sido bien regado (Gowing *et al.*, 1990; Sobeih *et al.*, 2004). En nuestros resultados, se nota que las plantas crecidas bajo secado parcial de la raíz (SPR80-30) con ciclos de alternancia húmedo-seco, aunque recibieron 30.1 % menor cantidad de agua en comparación a las plantas con riego completo (RC80) (testigo), mantuvieron el Ψ_{hoja} similar (Figura 5.8), consistente con resultados encontrados por varios investigadores (Loveys *et al.*, 2000; Stikic *et al.*, 2003; Zegbe-Domínguez *et al.*, 2003; López *et al.*, 2008) quienes encontraron diferencias no significativas en el potencial hídrico de plantas de manzano, vid y jitomate, en experimentos con sistema de raíz dividida y SPR

comparado en algunos casos con el riego deficitario. Al respecto, amplia evidencia demuestra que la fisiología asociada al SPR indica que las raíces de plantas bajo SPR sintetizan ácido abscísico, el cual actúa en la parte aérea induciendo un cierre estomático parcial. Por consiguiente, la tasa transpiratoria también se reduce manteniendo así el potencial hídrico de la hoja similar a plantas con riego comercial (raíz completa) (Davies *et al.*, 2002; Sobeih *et al.*, 2004).

5.6 Intercambio de gases

Los resultados de la conductancia estomática, transpiración y asimilación de CO₂ (fotosíntesis neta), muestran diferencias estadísticas por efecto de la variabilidad en las condiciones climáticas del invernadero (DPV), sustrato y niveles de HAR, en la mayoría de las mediciones efectuadas durante el periodo experimental (Cuadro 4-A). La conductancia estomática (g_s) en plantas que crecieron en tezontle, siempre fue mayor ($P \leq 0.05$), que en plantas cultivadas en composta (Figura 5.9A) debido a su alto Ψ_{hoja} ocasionado por la mayor disponibilidad de humedad en el sustrato. La disminución en la cantidad de agua aplicada produjo que los estomas de las plantas en composta redujeran 32.2, 3.9 y 39.0 % su apertura, en comparación con los valores de g_s de las plantas en tezontle a los 15, 30 y 45 ddit, respectivamente. La magnitud de la reducción en la apertura estomática fue suficiente para ocasionar disminución significativa ($P \leq 0.01$) en la transpiración (Figura 5.9B); sin embargo, aumentó 16.5 % la eficiencia en el uso del agua instantánea (EUAi) de estas plantas sólo a los 15 ddit (Figura 5.10). En las siguientes dos mediciones este proceso se invirtió, observando 14.8 y 19.2 % menor tasa de CO₂ fijado por unidad de agua transpirada en plantas crecidas en composta a los 30 y 45 ddit, respectivamente, cuando se comparó con plantas en tezontle (Cuadro 5-A). Este comportamiento puede atribuirse por una parte, al mayor DPV (Maurel *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2006) que se presentó en el primer periodo de muestreo que combinado con la menor cantidad de agua (23.9 %) aplicada a la composta, originó la mayor diferencia (-0.38 MPa) entre los Ψ_{hoja} de las plantas de ambos sustratos, alcanzando en este periodo (15 ddit) el menor potencial hídrico foliar (-1.22 MPa) como reportado por Steudle (2001) y Zegbe y Serna (2009).

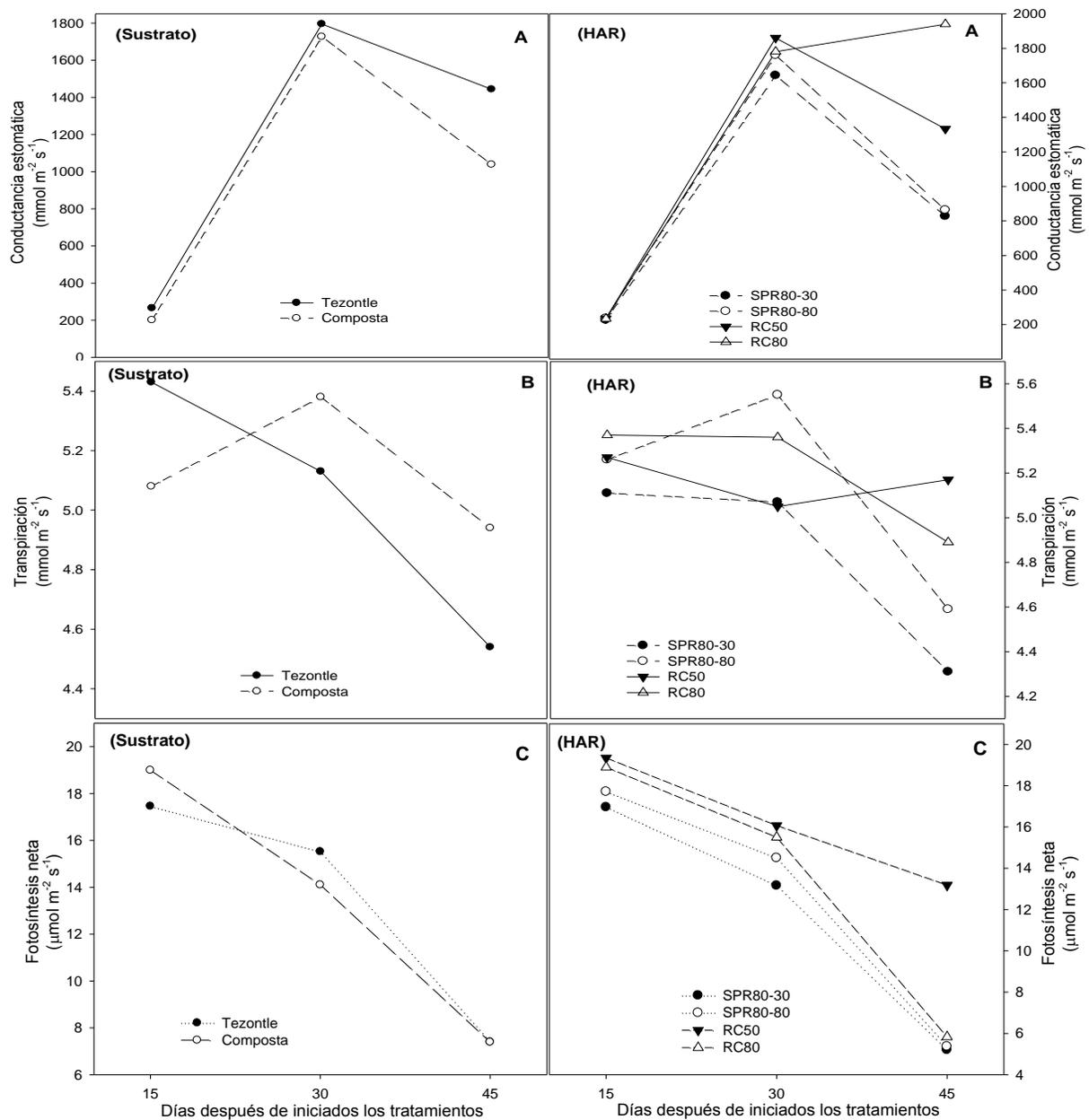


Figura 5.9. Comportamiento de la conductancia estomática (A), transpiración (B) y asimilación de CO₂ (C) de las plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], durante el periodo experimental

La Figura 5.9C, muestra que al final del periodo experimental (45 ddit) la fotosíntesis neta fue estadísticamente similar entre las plantas de ambos sustratos. Al respecto, Taiz y Zeiger (2002) mencionan que bajo condiciones de estrés hídrico ($< \Psi_{\text{hoja}}$), la sensibilidad de la conductancia estomática es mayor en comparación con la tasa fotosintética, concluyendo que este proceso fisiológico se debe a un aumento significativo en la eficiencia en el uso del agua instantánea (EUAi) de las plantas y/o a la poca sensibilidad de la fotosíntesis neta a los Ψ_{hoja} por debajo de -1.2 MPa como reportado por varios investigadores (Brix, 1962; Barrs, 1968; Troughton, 1969; Boyer, 1970), quienes en plantas de tomate, chile, algodón y soya, respectivamente, encontraron disminuciones significativas en la apertura estomática a partir de -1.0 MPa, mientras que, la tasa de asimilación de CO_2 empezó a disminuir ligeramente en Ψ_{hoja} más bajos (< -1.2 MPa).

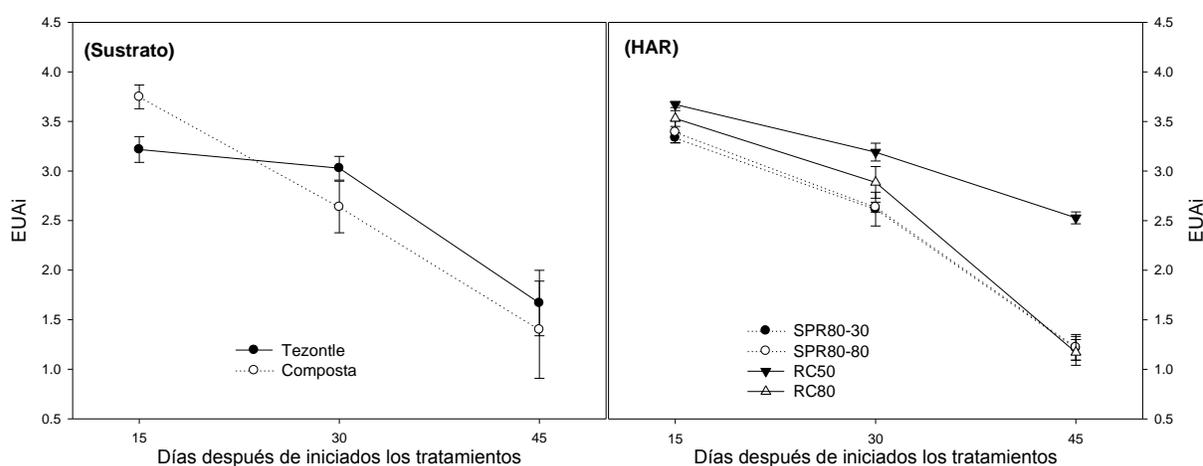


Figura 5.10. Comportamiento de la eficiencia en el uso del agua instantánea (EUAi) de plantas de pimienta morrón, en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes ≥ 80 %; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes ≥ 80 % (lado húmedo) y el otro ≥ 30 % (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 80 % y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 50 %], durante el periodo experimental

Los distintos niveles de HAR causaron diferencias significativas en la dinámica de intercambio de gases en la mayoría de las mediciones realizadas (Cuadro 4-A y Figura 5.9A, B y C). En lo que se refiere a la conductancia estomática, ésta se redujo ($P \leq 0.05$) 32.8 % en plantas regadas bajo el sistema de raíz dividida en comparación al riego convencional (sistema radical completo), independientemente de la cantidad de agua aplicada. Sin embargo, bajo secado parcial de la raíz con ciclos de alternancia húmedo-seco (SPR80-30) este comportamiento se intensificó, ya que la apertura del estoma (promedio de las tres mediciones) fue 6.1, 27.1 y 46.6 % menor cuando se comparó con los niveles de HAR SPR80-80, RC50 y RC80, respectivamente, misma que redujo significativamente la tasa transpiratoria en 6.2, 6.8 y 7.9 %. Esto hace pensar, en la presencia de una serie de señales no hidráulicas (químicas) que están influyendo en esta respuesta fisiológica como reportado por varios autores (Passioura *et al.*, 1993; Schulze, 1994; Davies *et al.*, 1994; Correia y Pereira, 1995; Dodd *et al.*, 1996; Aguilar *et al.*, 2000) quienes observaron que, la disminución de la conductancia estomática durante la sequía fue independiente de los cambios en el flujo de agua, atribuyendo la responsabilidad de ésta respuesta a la mayor acumulación de ácido abscísico (ABA) en estas plantas estresadas. Amplia evidencia indica que, sólo cuando parte del sistema radical sufre estrés hídrico (originado por el secado parcial de la raíz), puede producirse ABA (Zhang y Davies, 1989; Gowing *et al.*, 1990; Gollan *et al.*, 1992; Wilkinson y Davies, 1997; Cantore *et al.*, 2000; Kirda *et al.*, 2007), estos investigadores encontraron que, el contenido de ABA en la hoja tuvo los valores más altos bajo la práctica de SPR comparado con los tratamientos con riego completo (riego deficitario) a lo largo de la estación de crecimiento. El ABA al ser transportado vía el torrente de transpiración a la parte aérea de la planta, activa un sistema de alerta temprana que comienza por inducir procesos fisiológicos de adaptación antes que ocurra cualquier cambio en las relaciones hídricas (During *et al.*, 1996), como la inducción del cierre estomático parcial (Zhang y Davies, 1990; Gollan *et al.*, 1992; Kirda *et al.*, 2004), lo que permite a la planta usar económicamente el agua proporcionada eficazmente a través de las raíces parcialmente humedecidas (Jones, 1980; Cowan, 1982) al provocar una reducción en la tasa transpiratoria, manteniendo así, el potencial hídrico de la hoja

similar a plantas con riego comercial (riego completo), con un consecuente ahorro en la cantidad de agua aplicada (Davies *et al.*, 2002), sin afectar significativamente la tasa fotosintética de las plantas (Jones, 1992; Kirda *et al.*, 2004).

En la presente investigación, el menor Ψ_{hoja} (-1.15 MPa) encontrado en las plantas bajo RC50 (riego deficitario) no causó el cierre total del estoma, ya que éstos no son sensibles a los cambios en el Ψ_{hoja} hasta que exceda un cierto umbral, para el presente experimento, esta reducción no rebasó el rango crítico del Ψ_{hoja} (-1.5 a -1.8 MPa) que teóricamente induciría el cierre estomático total en esta especie vegetal (Horton *et al.*, 1982; Aloni *et al.*, 1991).

En lo que se refiere al comportamiento de la EUAi (Cuadro 5-A y Figura 5.10), ésta varió significativamente durante el periodo experimental. En términos generales, las plantas bajo RC50 que recibieron 116.2, 129.9 y 124.8 % menor cantidad de agua en comparación a las plantas crecidas en SPR80-80, a los 15, 30 y 45 ddit, respectivamente, fijaron 8.2, 21.0 y 106.9 % mayor CO_2 por unidad de agua transpirada. Mientras que, al comparar la EUAi en plantas cultivadas en SPR80-30, ésta tuvo una reducción no significativa de 5.8 y 10.3 % en los primeros 15 y 30 ddit, respectivamente, cuando se comparó con su testigo (RC80); sin embargo, a los 45 ddit con 43.2 % menor cantidad de agua aplicada en SPR80-30 las plantas fueron 3.5 % más eficientes en la fijación de CO_2 que las plantas bajo RC80.

5.7 Área foliar ($\text{m}^2 \text{pl}^{-1}$)

El área foliar representa la maquinaria fotosintética presente para la producción de fotoasimilados que serán destinados para cubrir las necesidades de los puntos de crecimiento activo (frutos, flores, ápice vegetativo y de la raíz, principalmente) de la planta, reflejándose de cierta manera en la producción o rendimiento final pues, se encuentra correlacionada positivamente con la cantidad de radiación fotosintéticamente activa (RFA) captada por la planta.

En el Cuadro 6-A se observa la evolución del crecimiento del área foliar por planta durante el periodo experimental. La inhibición del crecimiento de la hoja es una de las respuestas más tempranas de la planta al estrés hídrico disminuyendo las

pérdidas de agua de la misma (Shulze, 1986; Chaves *et al.*, 2002). El área foliar en plantas que recibieron ($P \leq 0.01$) menor cantidad de agua (plantas en composta) tuvo una reducción no significativa en las primeras dos mediciones realizadas, en comparación con la obtenida en plantas crecidas en tezontle, correlacionándose con la mayor demanda evaporativa de la atmósfera (valores más altos de DPV) que se presentó durante estos dos periodos (15 y 30 ddit) que indujeron los mayores déficits hídricos en estas plantas, con resultados en la disminución de la elongación celular, como reportado por Hsiao (1973) y Hsiao y Acevedo (1974), quienes mencionan que la disminución del crecimiento foliar probablemente es el resultado directo de la pérdida de presión de la turgencia para el agrandamiento celular.

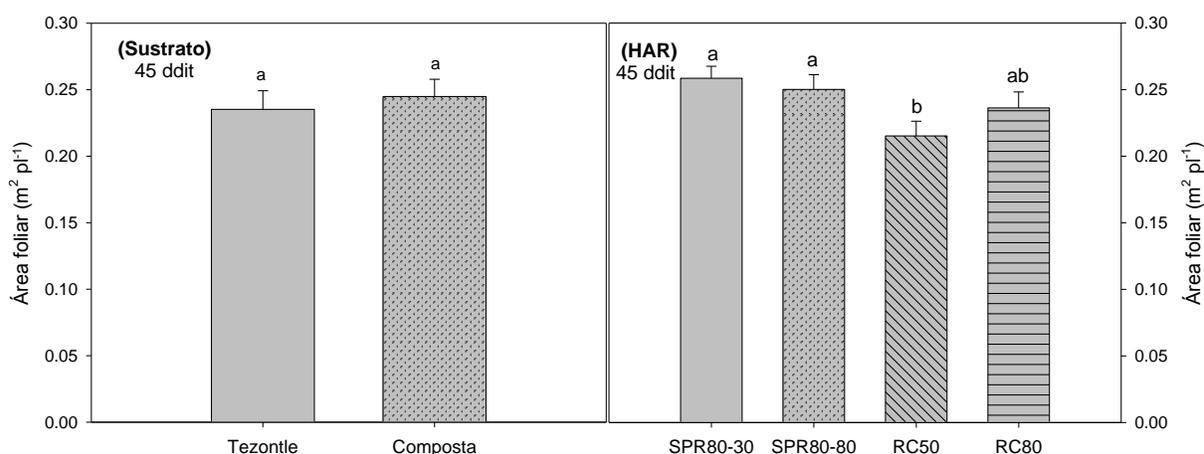


Figura 5.11. Área foliar ($\text{m}^2 \text{pl}^{-1}$) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], a los 45 días de haber iniciado los tratamientos (ddit). Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$) según la prueba de Tukey

Durante el tercer periodo de muestreo (45 ddit), las condiciones ambientales ($< \text{DPV}$) en que estuvieron creciendo las plantas no fue capaz de desarrollar déficit hídrico en plantas de ambos sustratos independientemente del agua aplicada,

encontrando un área foliar ligeramente mayor en plantas bajo composta en comparación a la presentada por plantas en tezontle, con valores de 0.2448 y 0.2352 $\text{m}^2 \text{pl}^{-1}$, respectivamente (Figura 5.11), al respecto, Mingeau (1975) y Katerji *et al.* (1993) mencionan que esto puede ser debido a un insignificante efecto del tratamiento aplicado sobre el crecimiento, o a un factor de recuperación durante el último periodo que permitieron a la planta alcanzar un nivel cercano a las demás plantas, como observado en soya y pimiento. Estos resultados son superiores a los reportados por Katerji *et al.* (1993) quienes en plantas de pimiento encontraron valores máximos de 0.13 y 0.12 $\text{m}^2 \text{pl}^{-1}$ en plantas bien regadas y bajo déficit hídrico, respectivamente, debido probablemente a las diferencias genéticas entre los cultivares evaluados.

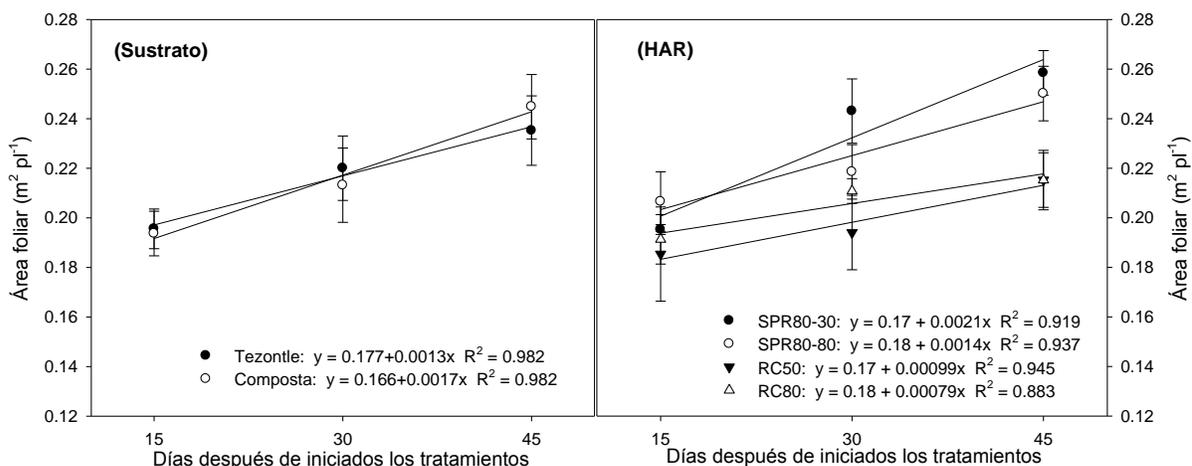


Figura 5.12. Comportamiento del área foliar ($\text{m}^2 \text{pl}^{-1}$) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], durante el periodo experimental

En general, el crecimiento diario de las hojas fue de 0.0017 y 0.0013 $\text{m}^2 \text{pl}^{-1}$ en plantas crecidas en composta y tezontle, respectivamente (Figura 5.12).

La aplicación de los distintos niveles de HAR afectó significativamente esta variable en las dos mediciones finales (30 y 45 ddit). Se observa claramente que el cierre parcial de los estomas en plantas bajo SPR80-30 mantuvo la turgencia celular similar y ligeramente superior a plantas con mayor aplicación de agua (SPR80-80 y RC80), formando un área foliar estadísticamente similar a éstas; mientras que, las plantas bajo riego completo (RC50) que recibieron el mayor déficit hídrico (Ψ_{hoja} más bajo) provocado por el menor nivel de HAR implementado, no lograron mantener la turgencia de las células ocasionando una disminución altamente significativa (17.2 %) del área foliar durante todo el periodo experimental, en comparación con la mayor área foliar encontrada (Cuadro 6-A del apéndice). Al observar, el ritmo de crecimiento de las hojas vemos que en plantas bajo SPR80-30 éste fue más acelerado a razón de $0.0021 \text{ m}^2 \text{ día}^{-1}$, en comparación a 0.0014 , 0.00099 y $0.00079 \text{ m}^2 \text{ día}^{-1}$ encontrado para plantas bajo SPR80-80, RC50 y RC80, respectivamente (Figura 5.12). A los 45 ddit los valores más altos de área foliar alcanzados fueron en plantas con raíz dividida con 0.2585 y $0.2501 \text{ m}^2 \text{ pl}^{-1}$ (SPR80-30 y SPR80-80, respectivamente) y los valores más bajos se observaron en plantas con raíz completa con 0.2362 y $0.2152 \text{ m}^2 \text{ pl}^{-1}$ (RC80 y RC50, respectivamente) (Figura 5.11). Resultados similares se han encontrado en tomate y pimiento, donde el área foliar no se afectó significativamente en tratamientos bajo SPR y RC (Davies *et al.*, 2000; López *et al.*, 2008). Al respecto, varios estudios indican que la hormona mayormente responsable de la disminución del crecimiento foliar es el etileno (Davies *et al.*, 2000; Sobeih *et al.*, 2004), estos investigadores encontraron que un aumento en la producción de etileno en las hojas en expansión estuvo correlacionada con la inhibición del crecimiento de la hoja en plantas de tomate normal, mientras que, las plantas mutante (con una baja producción de etileno) no presentaron aumento de la producción de esta fitohormona y tampoco inhibieron el crecimiento foliar cuando se mantuvieron en condiciones de déficit hídrico. Estos mismos investigadores han sugerido que una mayor acumulación de ABA en condiciones donde el etileno puede potencialmente acumularse, puede contrarrestar el efecto de inhibición de esta fitohormona (etileno) sobre el crecimiento y desarrollo e incluso promover la tasa de crecimiento foliar, en relación al crecimiento mostrado por plantas donde la acumulación de ABA es

menor. Sin embargo, los mecanismos por los cuales el ABA promueve el crecimiento foliar actualmente permanecen sin identificarse.

5.8 Materia fresca y seca de raíz, tallo, hoja y fruto

La dinámica de producción de materia fresca durante el periodo experimental, es fundamental para determinar la respuesta de las plantas a las condiciones ambientales, edáficas y a los diferentes niveles de HAR en que estuvieron desarrollándose. Se realizaron tres muestreos destructivos (15, 30 y 45 ddit); los datos obtenidos se reportan en los Cuadros 7-A al 10-A del apéndice. El análisis estadístico encontró efecto significativo en al menos una medición para el factor sustrato y niveles de HAR en la materia fresca de la raíz, hoja y fruto y, ningún efecto estadísticamente significativo en la materia fresca del tallo.

5.8.1 Materia fresca y seca de la raíz

Existe una estrecha relación entre el desarrollo del sistema radical de las plantas con su desarrollo vegetativo y productivo. Ruiz (2005) señala que la calidad del sistema radical influye grandemente en la calidad de la producción mediante tres vías: a) las raíces son el principal factor en el balance de carbohidratos, b) proveen de agua y nutrimentos para el crecimiento aéreo y la fructificación y, c) recogen señales (actúan como el cerebro de la planta) provenientes del suelo y que se transmiten bioquímicamente a la parte aérea, con repercusión en la producción.

Respecto al efecto de los factores en estudio, el sustrato influyó ($P \leq 0.01$) en el crecimiento de la raíz (g pl^{-1}) en todos los muestreos realizados. Las plantas en tezontle generaron 46.7, 41.8 y 53.1 % mayor biomasa radical, cuando se comparó con las plantas en composta a los 15, 30 y 45 ddit, respectivamente (Cuadro 7-A). Resultado de la tasa de crecimiento de la raíz mayor en tezontle que en composta, con ganancias de 0.427 y 0.196 $\text{g pl}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, respectivamente (Figura 5.13A). Al final del periodo experimental la materia fresca de la raíz crecida en tezontle alcanzó 101.12 g pl^{-1} mientras que en composta fue de 66.06 g pl^{-1} (Figura 5.14A).

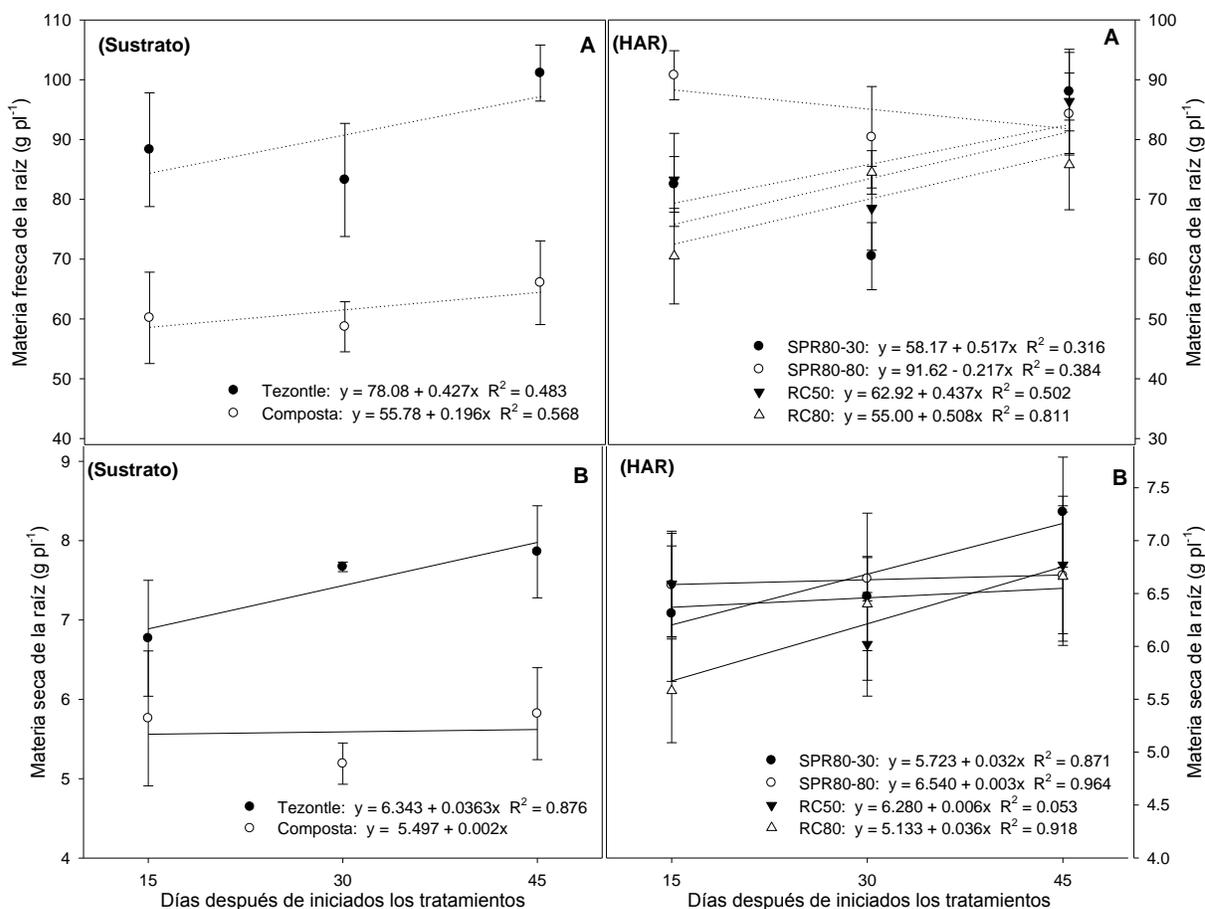


Figura 5.13. Comportamiento de la materia fresca (A) y seca (B) de la raíz (g pl^{-1}) de plantas de pimienta morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], durante el periodo experimental

Este mismo comportamiento se observó en la obtención de materia seca de la raíz por efecto del sustrato utilizado, así en tezontle se obtuvo un peso de la raíz 17.5, 50.7 y 35.0 % significativamente mayor en relación al encontrado en raíces crecidas en composta a los 15, 30 y 45 ddit, respectivamente (Cuadro 7-A del apéndice), lo que se correlacionó positivamente con la mayor ganancia diaria en el

peso de la raíz con 36.3 mg, en contraste a 2.0 mg día⁻¹ obtenido por raíces crecidas en composta (Figura 5.13B). Bajo este ritmo de crecimiento, a los 45 ddit las raíces en tezontle alcanzaron un peso seco de 7.86 g pl⁻¹ que fue mayor ($P \leq 0.05$) a 5.82 g pl⁻¹ obtenida por las raíces crecidas en composta (Figura 5.14B).

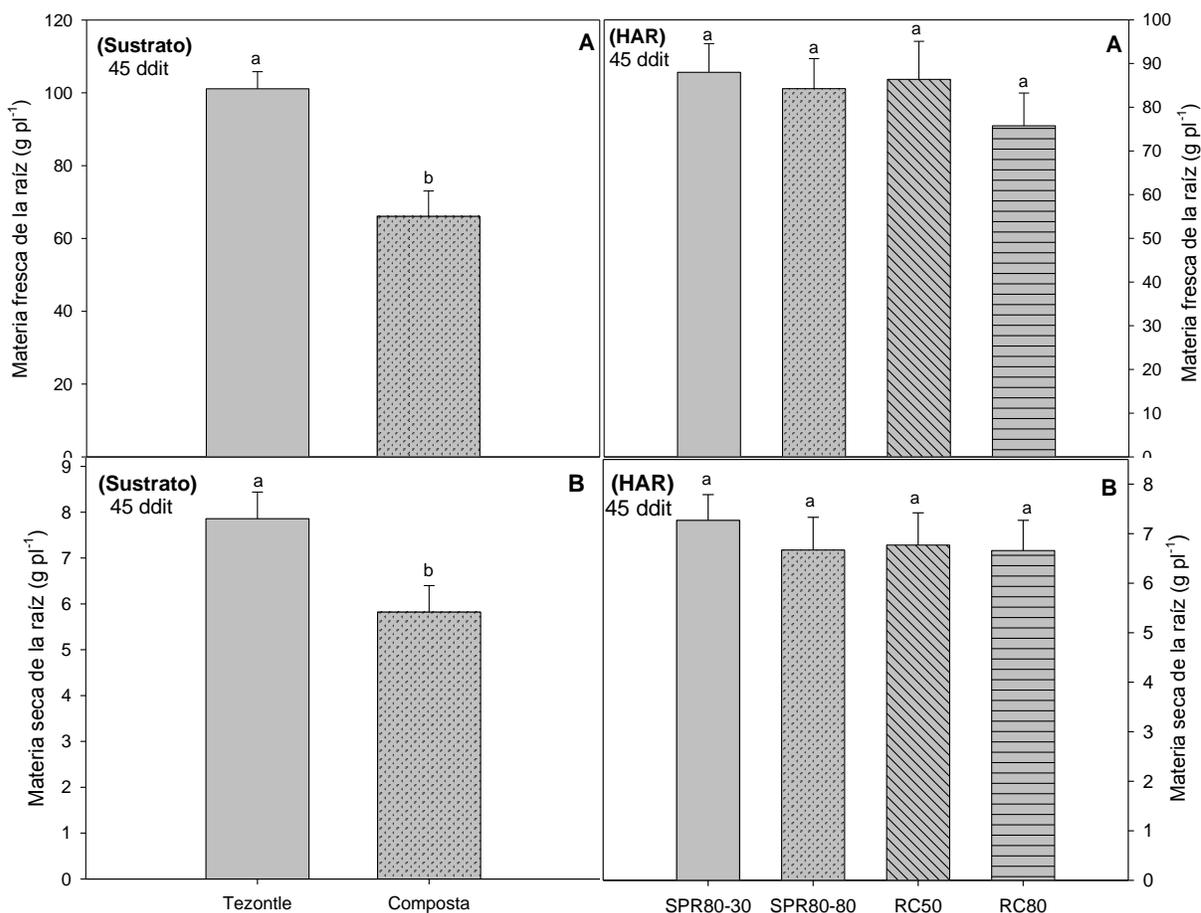


Figura 5.14. Materia fresca (A) y seca (B) de la raíz (g pl⁻¹) de plantas de pimienta morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes ≥ 80 %; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes ≥ 80 % (lado húmedo) y el otro ≥ 30 % (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 80 % y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 50 %], a los 45 días de haber iniciado los tratamientos (ddit). Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$) según la prueba de Tukey

Se explica el mayor valor de biomasa radical en tezontle por ser un sustrato con adecuada porosidad y densidad aparente (dentro de los rangos considerados como óptimos para sustratos), características que no ocasionan compactación del material haciéndolo muy penetrable a diferencia de la composta que presentó niveles de aireación por debajo del límite inferior del rango considerado como óptimo (10-30 %) ocasionado por una elevada retención de humedad, lo que nos permite suponer que debido a éstas propiedades físicas de la composta causó una disminución estadísticamente significativa del crecimiento y actividad de las raíces como reportado por varios investigadores (Russell y Russell, 1968; Atkinson, 1980; López *et al.*, 2005; Comas *et al.*, 2005), quienes indican que bajo condiciones de un suelo bien aireado, el sistema radical crece vigorosamente y desarrolla un gran sistema ramificado de raicillas, que son las responsables de la activa absorción de agua y nutrimentos. Estos pelos radicales son muy sensibles a condiciones adversas pues, a medida que disminuye la aireación en el medio, mueren rápidamente o son incapaces de desarrollarse, pasando de un color blanquecino a una pigmentación con tonalidades claras de café hasta llegar a tonos negros, dejando un sistema de raíces poco ramificadas, gruesas y cortas, este periodo puede durar 3 semanas o menos dependiendo de la aireación existente. La actividad metabólica de la raíz disminuye a medida que aumenta su pigmentación en el tiempo alcanzando valores mínimos aproximadamente a las 6 semanas (Comas y Eissenstat, 2000). Cabrera (1999) menciona que la porosidad total y, en particular, su distribución entre porosidad de aire y retención de humedad son consideradas las características físicas más importantes para el crecimiento y desarrollo de un cultivo en recipiente. De estas propiedades físicas, dependerá en mayor medida la disposición, tasa de crecimiento y la biomasa radical de las plantas (Hsiao, 1990), así se ha encontrado que bajo niveles adecuados de humedad, el sistema radical de las plantas establecidas en suelos arenosos, se distribuye mejor horizontal y verticalmente comparado con los cultivados en suelos arcillosos (Salazar y Cortez, 1986), este último con alta retención de humedad que generalmente disminuye el flujo de oxígeno hacia las capas inferiores (Lahav y Kalmar, 1992) y aumenta los contenidos de CO₂ e iones fitotóxicos (Kramer, 1989; Unger y Kaspar, 1994). Como

consecuencia de esto, y principalmente por el aumento de CO₂, se produce una inhibición de la absorción de agua y nutrimentos, además de una disminución en la permeabilidad de la raíz (Botella y Campos, 1993) y en situaciones extremas, ocurre una muerte parcial del sistema radical o sufre retraso la emisión de raíces blancas (Silva y Rodríguez, 1995). En un estudio realizado por Slowik *et al.* (1979) en plantas de aguacate crecidos en recipientes, determinaron que la mayor actividad radical se produjo con 21 % de oxígeno y que con valores menores, se redujo el peso seco de la raíz, disminuyó el número total de nutrientes en la planta y aumentó la translocación de iones fitotóxicos, como sodio y cloro, hacia la parte aérea.

La materia fresca de la raíz se afectó por los niveles de HAR implementados en la mayoría de los muestreos realizados (Cuadro 7-A). El promedio de los tres muestreos muestra que las plantas con raíz dividida (SPR) promovieron 8.5 % mayor biomasa radical cuando se comparó con la obtenida en riego completo (RC). En general, la materia fresca de la raíz fue estadísticamente mayor en niveles de HAR más altos. Al final del periodo experimental (45 ddit) se obtuvo la mayor biomasa radical alcanzando valores de 88.0, 86.4, 84.2 y 75.7 g pl⁻¹ en plantas bajo SPR80-30, RC50, SPR80-80 y RC80, respectivamente (Figura 5.14A), en donde se observa un ligero aumento no significativo en plantas con los niveles de HAR más bajos. Congruente con las mayores tasas de materia fresca radical producidas (0.52, 0.51, 0.44 y 0.22 g pl⁻¹ día⁻¹, bajo SPR80-30, RC80, RC50 y SPR80-80) en estos niveles de HAR (Figura 5.13A).

Por lo que se refiere a la biomasa seca de la raíz, los datos estadísticos indican que la translocación de los asimilados no se afectó por los niveles de HAR (Cuadro 7-A). Sin embargo, la ganancia de materia seca fue 13.1, 1.1 y 9.1 % ligeramente superior en plantas bajo SPR80-30 en relación a la producida por su testigo (RC80) que recibió significativamente mayor cantidad de agua. Congruente con la mayor tasa de producción de materia seca encontrada en las plantas de este nivel de HAR (Figura 5.13B). A los 45 ddit se observa que la raíz crecida en SPR80-30 y RC50 alcanzaron pesos de 7.3 y 6.8 g, respectivamente ligeramente mayor a 6.7 g formada por las raíces en SPR80-80 y RC80 (Figura 5.14B).

La amplia evidencia muestra que además de la señalización química continua que el SPR estimula (Stoll *et al.*, 2000), esta práctica induce el crecimiento de raíces secundarias que reducen la vulnerabilidad a la sequía (Liang *et al.*, 1996; Zhang y Tardieu, 1996). Al respecto, Mingo *et al.* (2004) encontraron que bajo la práctica de SPR la biomasa de la raíz aumentó un 55.0 % en relación a plantas uniformemente regadas. También se ha encontrado un aumento en la conductividad hidráulica radical por los canales de agua existentes en las células conocidos como aquaporinas (Green *et al.*, 1997; Martre *et al.*, 2002). Al respecto, varios investigadores han encontrado que la conductibilidad hidráulica de raíces de *Agave deserti*, manzano, vid, melocotón y peral aumentó significativamente después de los ciclos seco-húmedo inducidos por el SPR (North y Nobel, 1991; Poni *et al.*, 1992; Kang *et al.*, 2002). Esto puede ayudar a la planta para reunir su requerimiento de agua cuando sólo la mitad de la zona radical se le proporciona agua (Tan *et al.*, 1981). Varios reportes indican que frecuentemente las plantas pueden desarrollar crecimiento compensatorio de raíces en zonas del suelo favorables (niveles adecuados de humedad) cuando el crecimiento normal de éstas se ve restringido en otra parte. De la misma manera, puede haber crecimiento de raíces en zonas cercanas al punto de marchitamiento permanente si otras partes del sistema radical se encuentran en suelo húmedo como ocurre con el secado parcial de la raíz (Gil, 2007).

Este mismo autor menciona que el contenido hídrico o más específicamente los potenciales hídricos (Ψ_{agua}) a lo largo del perfil del suelo afectan directamente la distribución de raíces como también su morfología y su comportamiento funcional. A mayores Ψ_{agua} en el suelo se produce un crecimiento radical mayor, ya sea por provocar una menor resistencia a la penetración como así también generar un gradiente de potencial agua para un flujo rápido hacia las células radicales. De esta manera las raíces tienden a proliferar en las zonas más húmedas del perfil del suelo. Sin tomar en cuenta el tipo de suelo, generalmente se considera que un potencial de -1.50 MPa en toda la zona radical puede generar el marchitamiento permanente en la mayoría de los cultivos. Pero debe tenerse en cuenta que la tasa de extensión radical puede verse comprometida a valores superiores de potencial, por ejemplo debajo de

los -0.70 MPa la raíz se ve afectada pudiendo continuar creciendo cada vez más lentamente y, se detiene prácticamente debajo de -1.90 MPa (Ehlers *et al.*, 1980).

Un parámetro similar al Ψ_{agua} en el sustrato es el Ψ_{hoja} medido en la mañana (balance del contenido de agua de la planta con las zonas más húmedas del sustrato) como sugerido por Hsiao (1990). En nuestra investigación, las raíces en SPR80-30 y RC50 crecieron en Ψ_{agua} del sustrato entre -0.39 y -0.58 MPa, menor al rango de potencial hídrico en donde crecieron las raíces bajo SPR80-80 y RC80 (-0.32 y -0.50 MPa). En términos generales, se observa que las raíces de todos los niveles de HAR estuvieron creciendo bajo potenciales hídricos del sustrato que no afectaron su actividad y tasa de crecimiento; por el contrario se nota que, esta pequeña diferencia benefició las raíces en los potenciales hídricos menores provocando una ganancia mayor de su biomasa, principalmente bajo SPR80-30 donde la exposición simultánea del sistema radical a condiciones de alta humedad y sequía provocaron un aumento no significativo en el peso de las raíces como reportado por Kang *et al.* (1998) y Gil (2007).

Otro beneficio encontrado con el riego bajo SPR es que como resultado del ciclo alternante húmedo-seco, se tiene un sistema radical ampliamente distribuido en el volumen de suelo que puede hacer que los nutrientes sean más disponibles en la zona del suelo para las plantas como lo reportado por varios investigadores (Kang *et al.*, 1998; Shi y Kang, 2000; Kang *et al.*, 2001; Han y Kang, 2002; dos Santos *et al.*, 2003), quienes reportaron que la habilidad de las raíces de absorción de los nutrientes también fue mejorada cuando la zona de la raíz fue regada parcialmente y el riego parcial se cambió alternadamente.

5.8.2 Materia fresca y seca del tallo

El tallo es un órgano de sostén, translocación de agua, nutrientes y asimilados, de arquitectura y de almacén, funciones de gran importancia en la productividad de los cultivos (Adams, 1982). Leperen *et al.* (2003) mencionan que el estrés hídrico causado por una mala distribución del xilema provoca la abscisión de frutos, lo que demuestra la importancia de tener un tallo en buenas condiciones y de

buen diámetro. Una misma altura de planta y, un aumento en la biomasa del tallo implica un vástago de mayor grosor y por consiguiente un área transversal de floema mayor para un flujo de asimilados hacia los frutos más eficiente. Con un tallo más grueso se espera una mayor área transversal de colénquima y esclerénquima; por lo tanto, se aumenta su capacidad de sostener las estructuras reproductivas sin que se doble la planta, evitando así el posible daño a los tejidos de conducción (Regalado, 2002).

El análisis estadístico muestra que los factores de estudio no modificaron ($P \leq 0.05$) la producción de materia fresca y seca del tallo (Cuadro 8-A). Sin embargo, en relación al factor sustrato, las plantas cultivadas en composta siempre formaron los tallos más pesados durante el periodo experimental, alcanzando la mayor biomasa fresca (73.37 g pl^{-1}) a los 45 ddit, valor 8.39 % superior al encontrado en plantas crecidas en tezontle (Figura 5.15A). La función de respuesta que modela la producción de materia fresca del tallo fue lineal en ambos sustratos, donde la tasa de producción fue de 0.46 y 0.27 g día^{-1} en composta y tezontle, respectivamente (Figura 5.16A). La mayor biomasa fresca del tallo en composta pudo haber originado un tallo más grueso; con un área transversal del xilema y floema mayor para un flujo de agua, nutrimentos y asimilados mejorado hacia las partes en activo crecimiento (meristemas y frutos, principalmente), haciendo de alguna manera más fácil el traslado de las sustancias absorbidas por el significativamente menor sistema radical crecido en este sustrato. Al respecto, Sánchez (1997) reportó que áreas altas de floema propician tasas mayores de translocación de asimilados hacia los frutos por presentar menor resistencia al flujo, facilitando así el crecimiento. Por lo que se refiere a la biomasa seca del tallo, el promedio de los tres muestreos indica que ésta fue similar con 10.43 y 10.39 g pl^{-1} , en tezontle y composta respectivamente (Cuadro 8-A). La ganancia diaria de materia seca del tallo en tezontle fue de 105 mg , mientras que en composta se produjo 123 mg día^{-1} (Figura 5.16B), a esta velocidad de producción de materia seca, el tallo de plantas en tezontle y composta alcanzó un peso de 11.83 y 12.31 g pl^{-1} a los 45 ddit (Figura 5.15B).

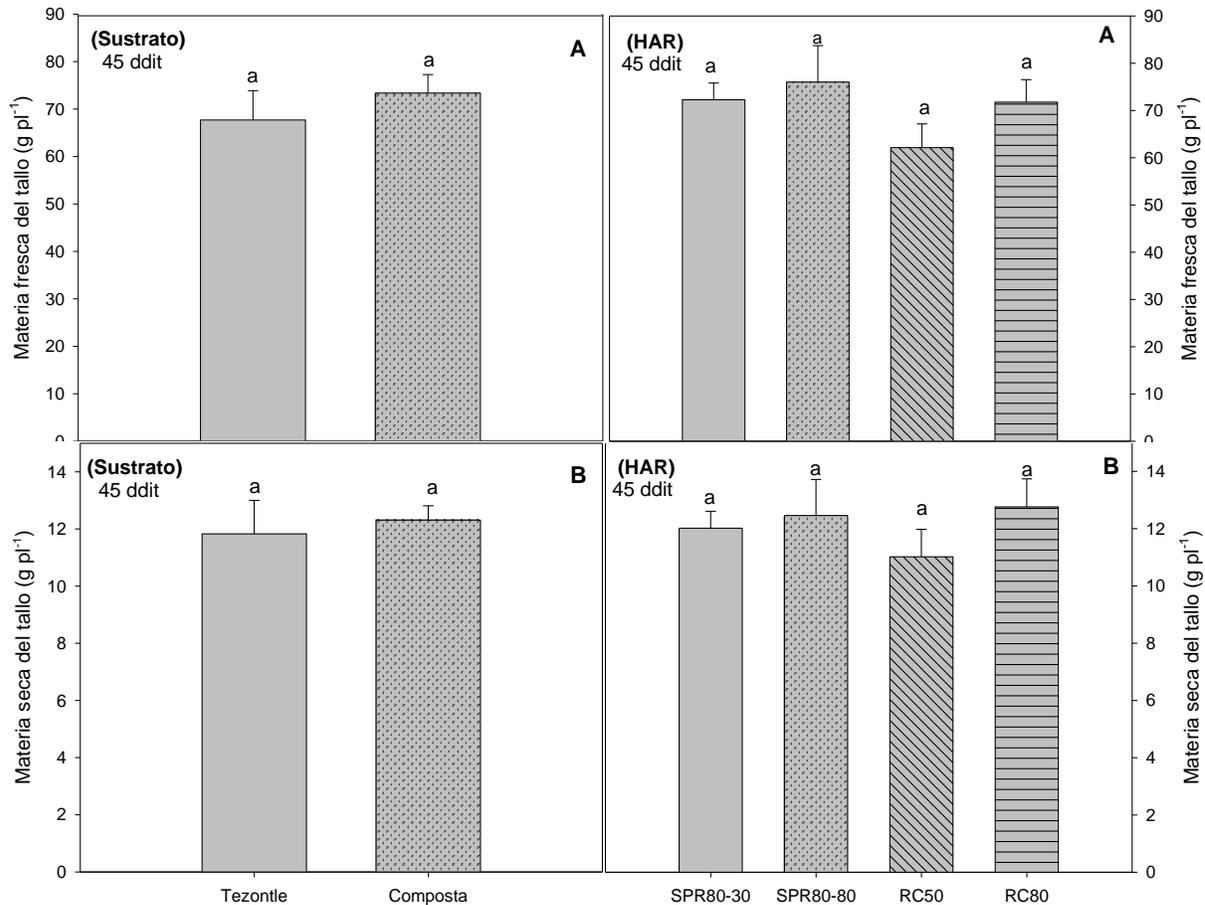


Figura 5.15. Materia fresca (A) y seca (B) del tallo (g pl^{-1}) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], a los 45 días de haber iniciado los tratamientos (ddit). Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$) según la prueba de Tukey

La materia fresca del tallo fue estadísticamente similar entre los diferentes niveles de HAR durante el periodo experimental. En el Cuadro 8-A, se observa que el peso de los tallos de plantas bajo SPR fue 7.9, 14.0 y 10.8 % superior en relación a los formados bajo riego completo a los 15, 30 y 45 ddit, respectivamente.

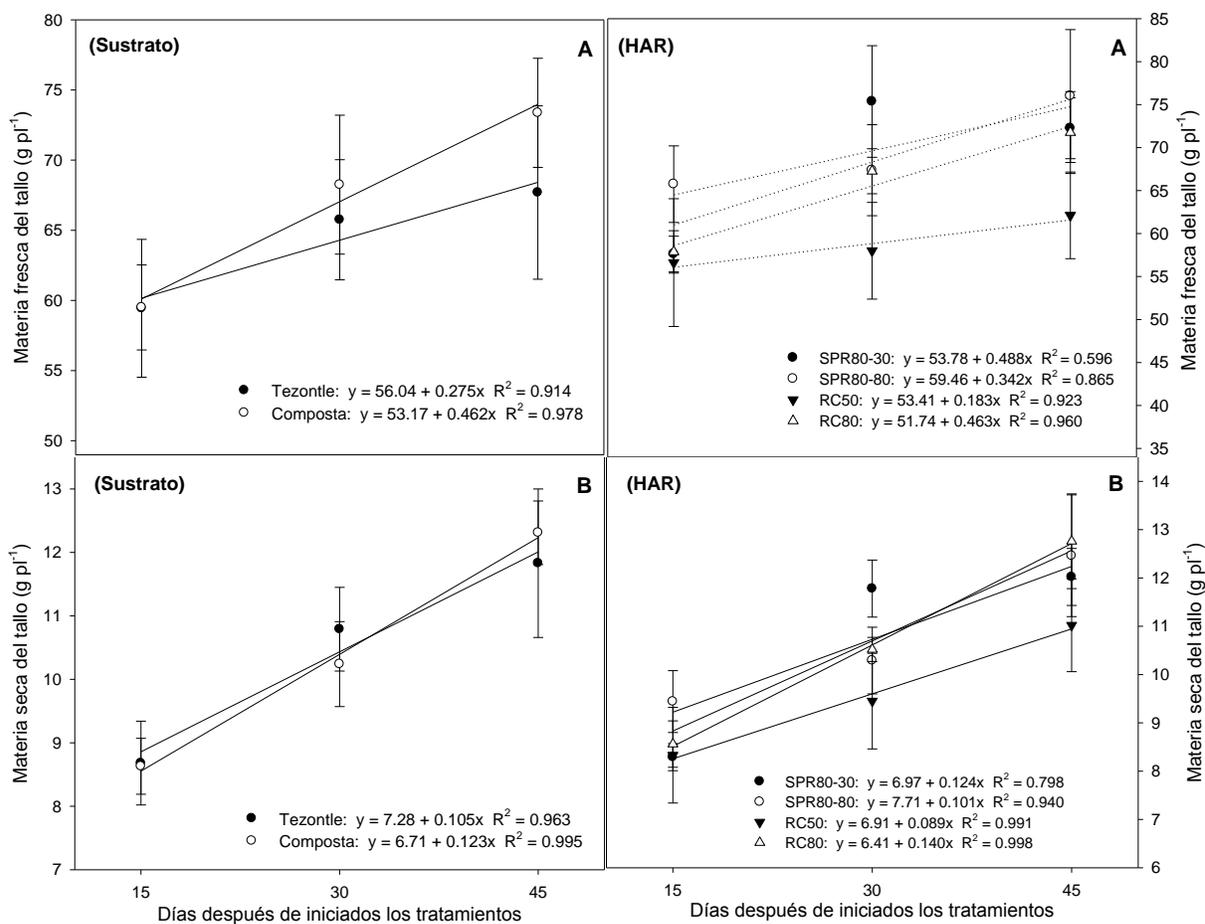


Figura 5.16. Comportamiento de la materia fresca (A) y seca (B) del tallo (g pl^{-1}) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], durante el periodo experimental

Al final del periodo experimental (45 ddit) la mayor biomasa fresca del tallo (76.0 g pl^{-1}) se formó bajo SPR80-80 y la menor en RC50 (62.1 g pl^{-1}) que recibió significativamente menor cantidad de agua. Mientras que, este parámetro fue similar en SPR80-30 y RC80, es decir, los 13.8 L pl^{-1} menor en plantas bajo SPR no influyeron en la ganancia de materia fresca del tallo con 72.2 y 71.7 g pl^{-1} en SPR80-

30 y RC80, respectivamente (Figura 5.15A). El SPR80-30 provocó la mayor tasa diaria de producción de biomasa fresca del tallo con 0.49 g, seguido de RC80 (0.46 g), SPR80-80 (0.34 g) y RC50 (0.18 g) (Figura 5.16A).

Un comportamiento similar se observó en la variable materia seca del tallo por efecto de la HAR en el sustrato (Cuadro 8-A). Mayor cantidad de fotoasimilados se encontraban formando parte de los tallos bajo SPR80-80, mientras que en RC50 siempre se encontró la menor cantidad de biomasa seca durante el periodo experimental. A los 45 ddit, se obtuvieron 12.76, 12.46, 12.02 y 11.02 g pl⁻¹ en RC80, SPR80-80, SPR80-30 y RC50, respectivamente (Figura 5.15B). Con ganancias de 140, 101, 124 y 89 mg día⁻¹ para los niveles de HAR antes mencionados (Figura 5.16B). Resultados similares fueron reportados por Dorji *et al.* (2005) y López *et al.* (2008) quienes encontraron diferencias estadísticas no significativas en la materia seca del tallo de plantas de chile y tomate bajo SPR y el testigo.

5.8.3 Materia fresca y seca de la hoja

La capacidad de un cultivo para interceptar la radiación solar y realizar fotosíntesis no sólo depende de la distribución de la radiación solar entre los estratos, sino también de la cantidad total de ésta absorbida por el dosel y la absorción depende del hábito de crecimiento, del ángulo de la hoja, los cambios en la distribución espectral del flujo fotónico activador de la fotosíntesis (FF) a través del dosel, de las múltiples reflexiones del FF dentro del dosel y la disposición, arreglo y forma, y orientación de las hojas en el dosel (Nobel y Long, 1988). Al respecto, se han encontrado pérdidas del 30 al 50 % de la materia seca de las hojas inferiores de la mayoría de los cultivos cuando no reciben suficiente luz durante gran parte del día, no contribuyen en la fotosíntesis neta y por lo general mueren de manera prematura. De lo anterior se desprende que un dosel bien distribuido mejora la intercepción de radiación fotosintéticamente activa (RFA) y en consecuencia el rendimiento.

El mayor dosel vegetal se correlacionó positivamente con la mayor materia fresca y seca de las hojas en plantas cultivadas en tezontle, resultado de la mayor intercepción de la RFA (Cuadro 9-A). El factor sustrato no afectó estadísticamente la

producción de materia fresca foliar, sin embargo, esta variable fue ligeramente superior en tezontle a los 15 y 30 ddit con 96.81 y 112.75 g pl⁻¹, en relación a la formada en composta (93.44 y 108.25 g pl⁻¹), respectivamente.

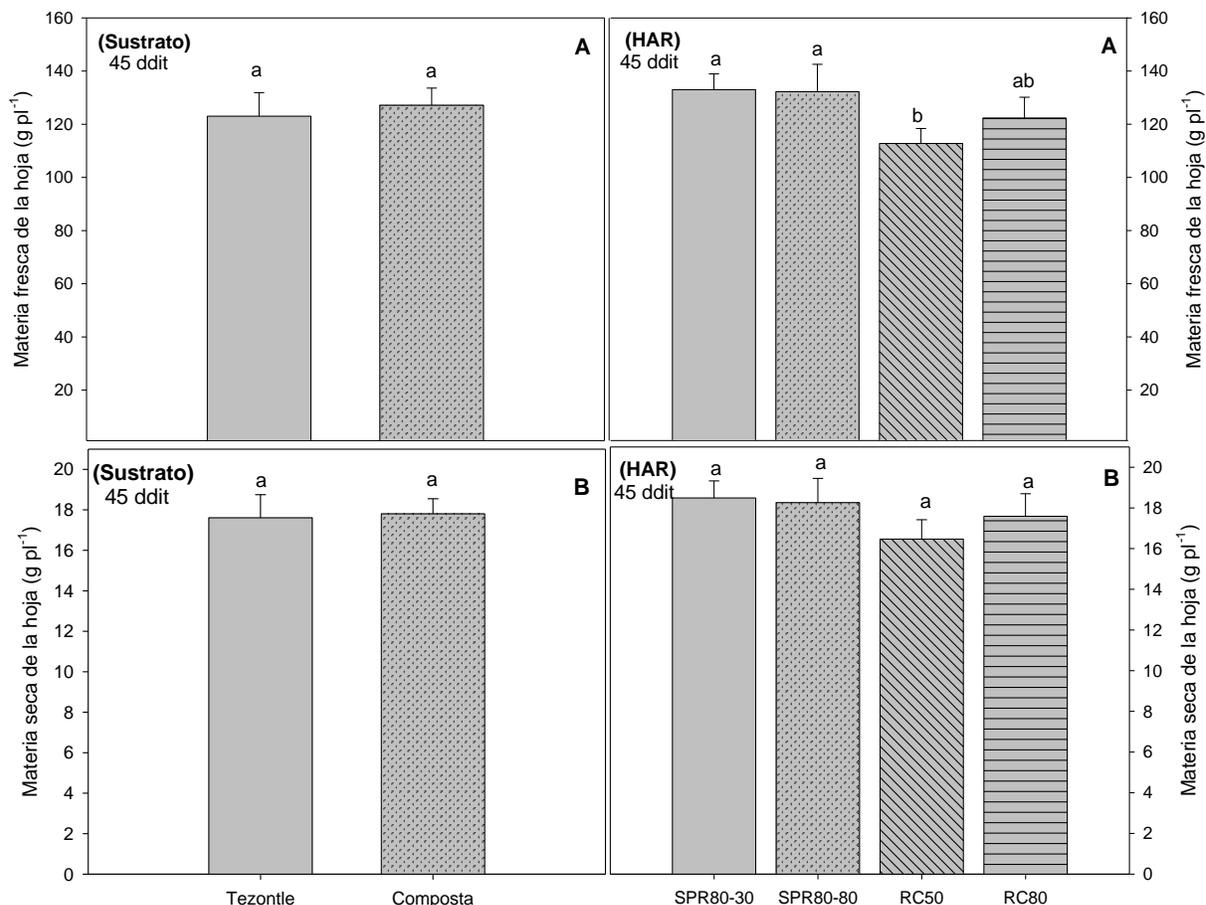


Figura 5.17. Materia fresca (A) y seca (B) de la hoja (g pl⁻¹) de plantas de pimienta morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes ≥ 80 %; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes ≥ 80 % (lado húmedo) y el otro ≥ 30 % (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 80 % y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 50 %], a los 45 días de haber iniciado los tratamientos (ddit). Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$) según la prueba de Tukey

A los 45 días se obtuvieron las hojas más pesadas y fueron formadas en plantas cultivadas en composta (Figura 5.17A) producto de la mayor tasa de producción diaria (1.12 g) de estas plantas cuando se comparó con la producida por plantas en tezontle con 0.87 g día⁻¹ (Figura 5.18A).

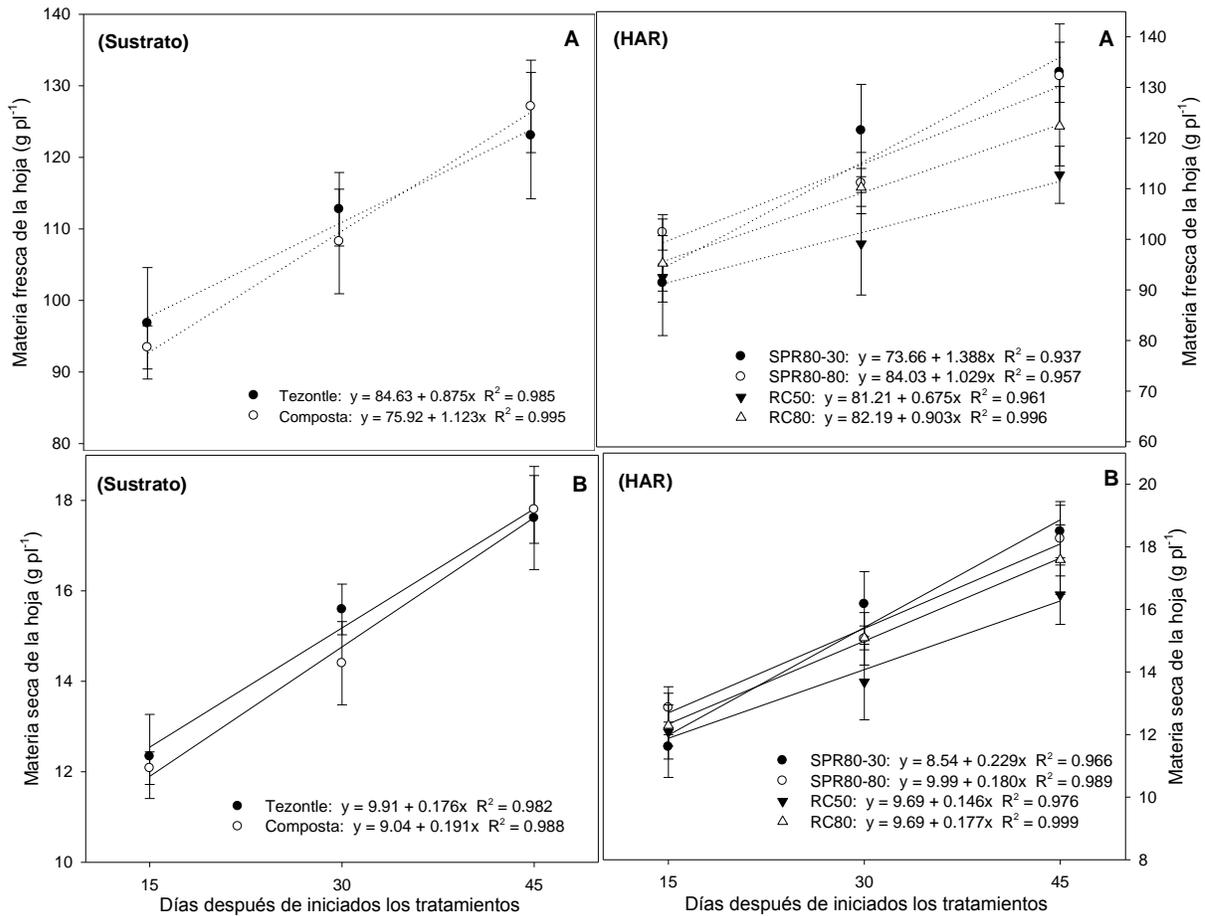


Figura 5.18. Comportamiento de la materia fresca (A) y seca (B) de la hoja (g pl⁻¹) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes ≥ 80 %; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes ≥ 80 % (lado húmedo) y el otro ≥ 30 % (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 80 % y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 50 %], durante el periodo experimental

Comportamiento similar se observó en la materia seca de las hojas por efecto del sustrato, así la producción promedio en tezontle fue de 15.18 g, 2.84 % ligeramente superior al encontrado en plantas en composta (Cuadro 9-A). En el tercer muestreo se encontró la mayor biomasa seca foliar con 17.80 y 17.61 g pl⁻¹ en composta y tezontle, respectivamente (Figura 5.17B), con tasas diarias de 191 y 176 mg (Figura 5.18B). Se nota que la mayor área foliar formada en plantas en tezontle provocó un aumento no significativo en la tasa de producción de materia fresca y seca, producto de la mayor evapotranspiración realizada por estas plantas durante el periodo experimental.

Los niveles de HAR afectaron ($P \leq 0.05$) la producción de materia fresca y seca foliar sólo a los 45 ddit, con disminuciones más amplias a medida que las plantas crecieron en un nivel más bajo de HAR, éste efecto fue más significativo cuando las plantas se encontraban en composta, es decir, la menor materia fresca y seca de las hojas se obtuvo bajo composta+RC50 (Cuadro 9-A). Un hallazgo importante fue que las plantas en SPR80-30 utilizaron eficientemente la menor agua aplicada al formar la mayor materia fresca y seca en 2 de 3 muestreos realizados cuando se comparó con su testigo (RC80) que recibió significativamente una cantidad de agua mayor, resultado de los beneficios (cierre parcial de los estomas, similar Ψ_{foliar} , poco efecto sobre el intercambio de gases) obtenidos por mantener el sistema radical bajo secado parcial de la raíz.

Al final del periodo experimental, las plantas bajo SPR80-30 y SPR80-80 produjeron significativamente la mayor materia fresca de hojas con 133.0 y 132.2 g pl⁻¹, respectivamente, 8.7 y 18.0 % superior a la formada bajo RC80 y RC50 (Figura 5.17A), resultado de las mayores tasas de producción de materia fresca por día que variaron de 1.03 a 1.39 g en plantas bajo SPR y de 0.67 a 0.90 g en plantas bajo RC (Figura 5.18A). En cuanto a la materia seca de la hoja, plantas bajo SPR80-30 formaron las hojas con mayor fotoasimilados alcanzando 18.49 g pl⁻¹ peso 1.2, 5.1 y 12.3 % mayor aunque no estadísticamente significativo en relación al obtenido en SPR80-80, RC80 y RC50, respectivamente (Figura 5.17B). Comportamiento correlacionado positivamente con la mayor tasa de producción de materia seca foliar

en SPR80-30 con ganancias diarias de 229 mg, mientras que la menor ganancia se obtuvo en RC50 con 146 mg día⁻¹ (Figura 5.18B). Resultados similares fueron reportados por Dorji *et al.* (2005) y López *et al.* (2008) quienes encontraron diferencias estadísticas no significativas en la materia seca de la hoja de plantas de chile y tomate bajo SPR y el testigo.

5.8.4 Materia fresca y seca del fruto

Los resultados indican que hubo diferencia estadística sólo en la producción de materia fresca por efecto del sustrato y nivel de HAR en que las plantas estuvieron desarrollándose, en al menos uno de tres muestreos (Cuadro 10-A).

El sustrato de cultivo influyó en la producción de materia fresca de fruto durante el periodo experimental, sin embargo, este efecto sólo fue estadísticamente significativo a los 30 ddit (Cuadro 10-A). En el primer muestreo (15 ddit), las plantas en composta produjeron la mayor biomasa fresca con 433.4 g pl⁻¹, cuando se comparó con 413.4 g pl⁻¹ formados en tezontle. Este comportamiento no continuó en los siguientes muestreos, pues las plantas en tezontle produjeron 823.7 y 1100.9 g pl⁻¹ a los 30 y 45 ddit, valores 8.3 y 8.6 % superior a los encontrados en composta en los mismos muestreos (Figura 5.20A). En la Figura 5.19A se observa que en tezontle se produjo la mayor materia fresca por día (22.92 g), en relación a la tasa diaria de producción en composta (19.33 g). La dinámica de producción de materia seca del fruto fue estadísticamente similar por efecto de los sustratos utilizados (Cuadro 10-A). Se encontró una relación positiva entre la biomasa seca y fresca de los frutos, es decir, frutos con el mayor peso fresco tuvieron un aumento no significativo en su materia seca. La Figura 5.20B muestra la mayor materia seca obtenida (45 ddit) alcanzando 74.9 y 73.8 g pl⁻¹ en tezontle y composta, respectivamente, congruente con 1.8 y 1.7 g pl⁻¹ día⁻¹ formados en estos sustratos (Figura 5.19B). Este comportamiento se debe principalmente a la diferencia en la práctica de nutrición realizada para ambos sustratos durante el periodo experimental, ya que las plantas en composta desde el momento del trasplante satisficieron su demanda de nutrimentos con la cantidad de elementos nutritivos contenidos en el sustrato, mientras que, las plantas en tezontle (sustrato inerte) empezaron a recibir solución

nutritiva a los diez días después del trasplante, esto provocó que en el primer muestreo (15 ddit) las plantas en composta produjeran cantidad mayor de materia fresca y seca de frutos. Sin embargo, este comportamiento no continuó debido a lo indicado por De Grazia *et al.* (2006) quienes mencionan que la incorporación de nutrimentos en forma mineral a través de la solución nutritiva mejora su disponibilidad inmediata, contrarrestando el efecto de inmovilización transitoria ocasionada por los componentes orgánicos (C:N, C:P) contenidos en la composta.

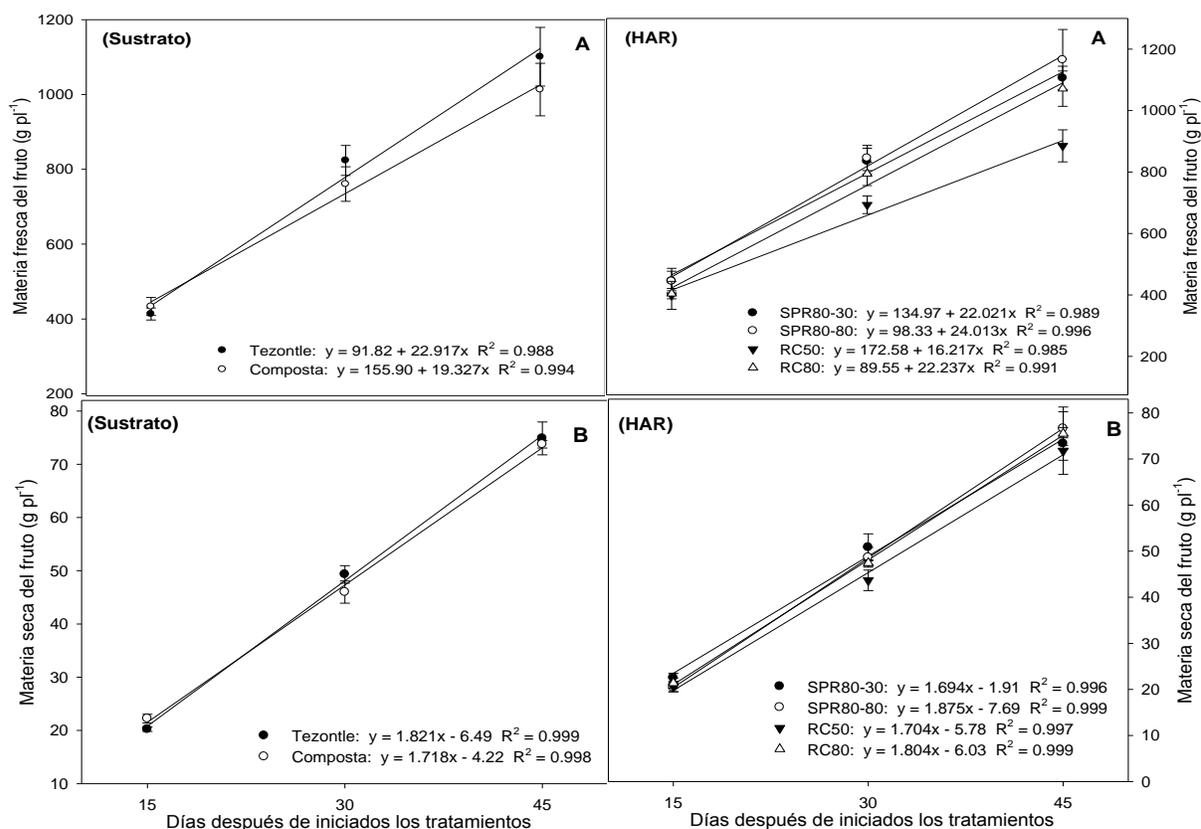


Figura 5.19. Comportamiento de la materia fresca (A) y seca (B) del fruto ($g\ pl^{-1}$) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], durante el periodo experimental

La aplicación de solución nutritiva y un sistema radical bien distribuido en tezontle ocasionó que las plantas en este sustrato aprovecharan mayormente los recursos agua y nutrientes proporcionados, lo que se reflejó en un aumento de la materia fresca y seca a los 30 y 45 ddit. En contraste con un sistema radical corto y poco proliferado en composta que exploró un volumen de suelo menor con la obtención disminuida de agua y nutrientes.

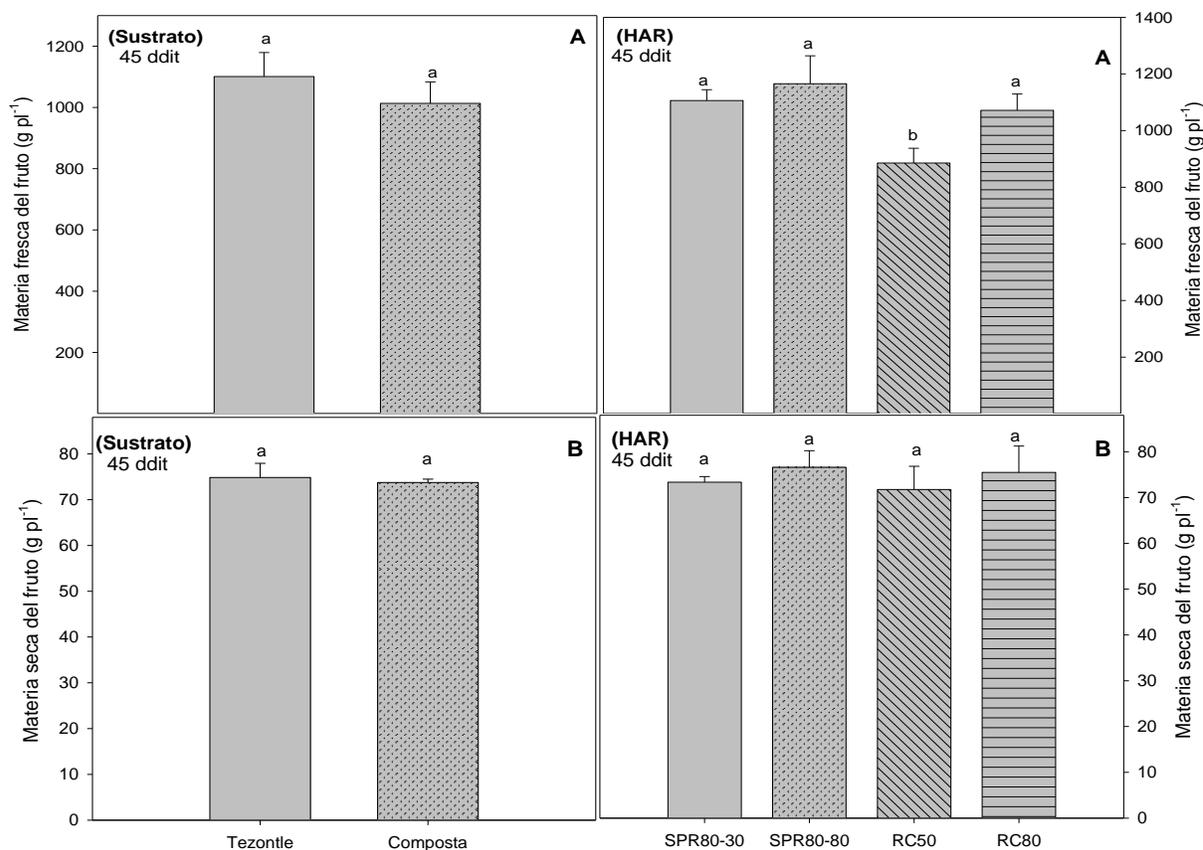


Figura 5.20. Materia fresca (A) y seca (B) del fruto (g pl^{-1}) de plantas de pimienta morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], a los 45 días de haber iniciado los tratamientos (ddit). Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$) según la prueba de Tukey

La aplicación de agua condicionada por los niveles de HAR afectó mayormente la producción de materia fresca de frutos. Los beneficios encontrados por el riego de raíces divididas y principalmente por el secado parcial de la raíz (similar Ψ_{hoja} , cierre parcial de los estomas, poco ó ningún efecto sobre el crecimiento e intercambio de gases) indujeron que las plantas bajo SPR80-80 y SPR80-30 formaran estadísticamente la mayor materia fresca de frutos durante el periodo experimental en relación al encontrado bajo RC80 y RC50 con riego convencional (raíz completa) (Cuadro 10-A). La Figura 5.19A muestra el ritmo de producción de fruto fresco, que se afectó por los niveles de HAR, a medida que aumentó el agua aplicada ($>$ HAR en el sustrato) la ganancia diaria fue mayor, así para SPR80-80, RC80, SPR80-30 y RC50 tenemos 24.01, 22.24, 22.02 y 16.22 g pl⁻¹ día⁻¹, respectivamente. A esta velocidad de producción, las plantas llegaron a formar 1165.4, 1071.5, 1106.0 y 885.2 g pl⁻¹ bajo los niveles de HAR antes mencionados a los 45 ddit (Figura 5.20A). Claramente se nota que las plantas bajo SPR80-30 tuvieron 3.2 y 24.9 % mayor peso fresco de frutos en comparación a su testigo (RC80) y al RC50.

La materia seca de los frutos se afectó en menor medida por los niveles de HAR (Cuadro 10-A). Durante el periodo experimental las plantas crecidas bajo SPR80-80, RC80 y SPR80-30 formaron estadísticamente similar biomasa seca del fruto (76.61, 75.50 y 73.36 g pl⁻¹ a los 45 ddit). Mientras que, una reducción ($P \leq 0.01$) de 31.6 % en el peso fresco de los frutos en RC50 produjo 6.7 % menor (no significativa) biomasa seca cuando se comparó con el nivel de HAR más alto (SPR80-80) a los 45 ddit (Figura 5.20B), resultado de la menor ganancia diaria (1.70 g pl⁻¹) (Figura 5.19B). Consistente con lo reportado por Dorji *et al.* (2005), quienes indicaron que el movimiento del agua en el fruto puede haber disminuido con el desarrollo progresivo del déficit hídrico sin afectar significativamente la translocación de la materia seca en el fruto. Resultados similares han sido obtenidos en otros estudios realizados en Chile y jitomate, donde el secado parcial de la raíz no afectó significativamente la materia fresca o seca de fruto por planta (Davies *et al.*, 2000; Stikic *et al.*, 2003; Zegbe-Domínguez *et al.*, 2003; Kirda *et al.*, 2004; Dorji *et al.*, 2005 y López *et al.*, 2008).

5.8.5 Distribución de la materia fresca y seca

El rendimiento de un cultivo está dado por la capacidad de acumular biomasa (materia fresca y seca) en los órganos que se destinan a la cosecha y un incremento proporcional de la biomasa destinada a estos órganos garantiza un incremento del rendimiento. Así, la distribución de materia seca entre los diferentes órganos de la planta tiene un papel fundamental en la producción de un cultivo. Los términos fuente y demanda se usan para señalar la dirección del flujo de fotosíntesis entre ciertos órganos, dirección que depende de la fase de desarrollo. Desde el punto de vista metabólico en la fuente se producen los asimilados por el proceso de fotosíntesis o por el catabolismo y la remoción de materiales almacenados, mientras que la demanda utiliza dichos asimilados en procesos respiratorios de crecimiento (Wilson, 1972). De esta manera se tienen órganos que producen fotoasimilados y órganos que los consumen; algunos de ellos pueden ser demandas en etapas tempranas de su desarrollo, incluyendo éstas a todas las partes en crecimiento. La habilidad de los diferentes órganos para obtener asimilados es medida como el grado de acumulación de materia seca o el grado de carbono importado.

El sustrato de cultivo modificó la distribución de materia fresca en la planta siendo la raíz, el órgano mayormente afectado. Las características físicas del tezontle permitieron un desarrollo mayor del sistema radical, que representó del 7.3 a 13.4 % de la materia fresca total de la planta, mayor a 5.2 y 9.3 % obtenido en composta durante el periodo experimental. Respecto a la materia fresca de los frutos, en términos generales éstos siempre representaron los porcentajes más altos de la materia fresca total por planta en ambos sustratos. En los primeros dos muestreos (15 y 30 ddit), la proporción de materia fresca del fruto fue ligeramente mayor en composta, sin embargo, a los 45 ddit ésta fue similar con 79.0 y 79.2 % en tezontle y composta, respectivamente, resultados consistentes con lo mencionado por Hurd *et al.* (1979) quienes reportaron que en una planta de tipo indeterminado, la ganancia de la materia fresca por el fruto alcanza cerca del 80 % de la materia fresca de la planta, debido a que el fruto acumula más agua que otros órganos.

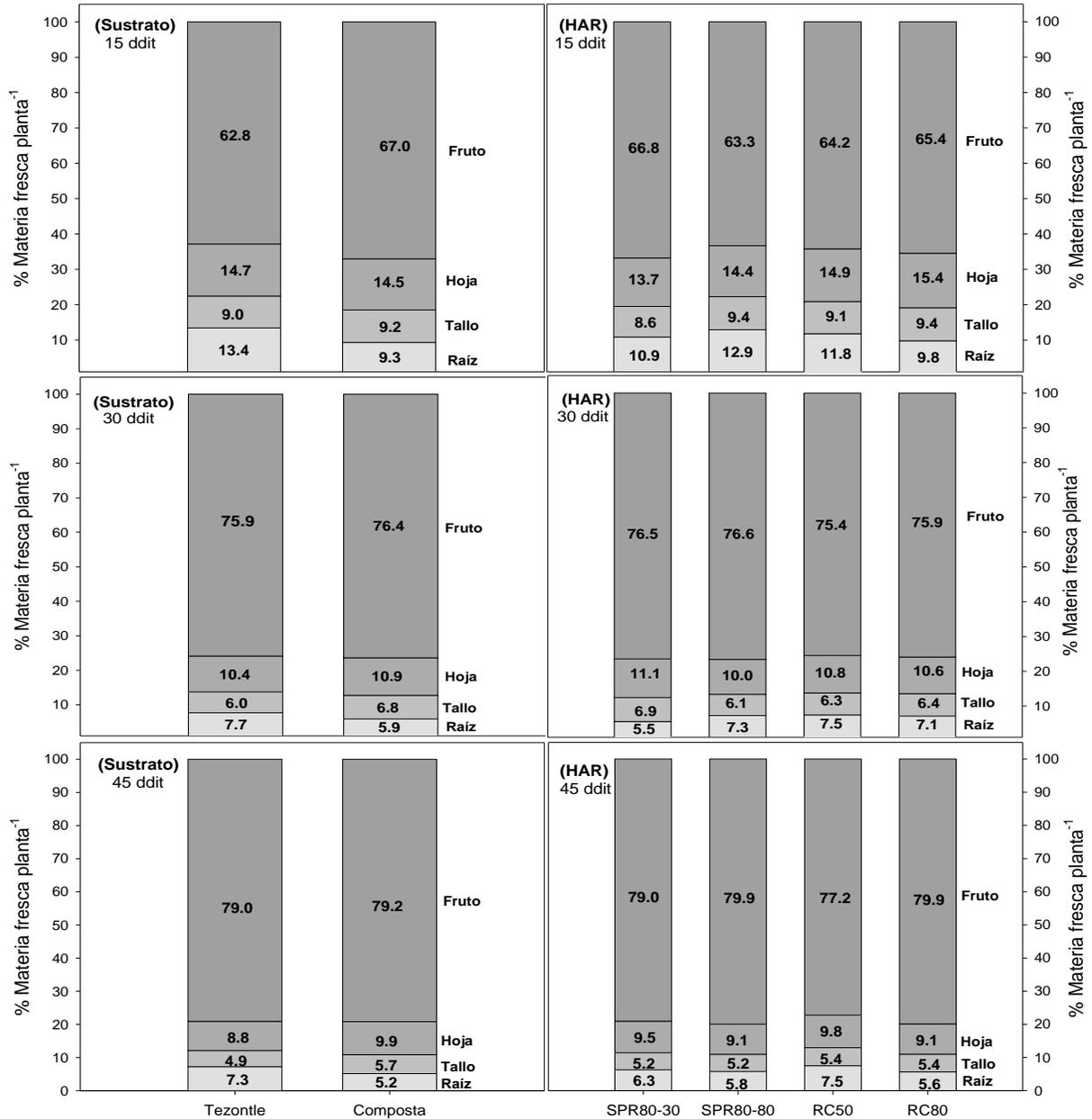


Figura 5.21. Distribución de la materia fresca total de la planta de pimiento morrón entre sus diferentes órganos (raíz, tallo, hoja y fruto) en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes ≥ 80 %; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes ≥ 80 % (lado húmedo) y el otro ≥ 30 % (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 80 % y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 50 %], durante el periodo experimental

En lo que se refiere a la magnitud de la materia fresca de hojas y tallos, ésta fue similar entre los sustratos de cultivo utilizados (Figura 5.21).

Los niveles de HAR también influyeron en la distribución de la materia fresca entre los órganos de la planta (en frutos y raíces principalmente). El mayor déficit hídrico producido por el nivel de HAR más bajo (RC50) indujo que los frutos representaran ligeramente menor proporción de materia fresca total de la planta con 77.2 %, en relación a los frutos obtenidos bajo SPR80-80, RC80 y SPR80-30 que representaron por arriba del 79.0 %, a los 45 ddit. La hoja y tallo fueron los órganos que menor variación presentaron por efecto de la HAR, mientras la raíz en SPR80-30 y RC50 representó el 6.3 y 7.5 %, respectivamente, mayor al obtenido en SPR80-80 (5.8 %) y bajo RC80 (5.6 %), a los 45 ddit. Como podemos observar en la Figura 5.21, una vez que los frutos empiezan a crecer, el rango de crecimiento vegetativo disminuye al mínimo pasando de 22.3, 23.8, 24.0 y 24.8 % (15 ddit) a 14.7, 14.3, 15.2 y 14.5 (45 ddit) en SPR80-30, SPR80-80, RC50 y RC80, respectivamente, comportamiento similar con lo reportado por Salter (1958). Al respecto, Hurd *et al.* (1979) mencionan que el crecimiento neto de la raíz cesa cuatro semanas después de la primera antesis y el crecimiento de la hoja es reducido considerablemente cuando el rango de crecimiento total del fruto alcanza un máximo. La distribución de materia seca entre los diferentes órganos de una planta es el resultado final de un conjunto ordenado de procesos metabólicos y de transporte que gobiernan el flujo de asimilados a través de un sistema fuente–demanda. Las actividades involucradas en este proceso no son estáticas y pueden cambiar diariamente y a lo largo del período de desarrollo de la planta (Patrick, 1988). Los asimilados, producidos por la fotosíntesis en los órganos fuente (principalmente las hojas), pueden ser almacenados o translocados, vía floema, a los diferentes órganos de demanda. En la mayoría de las especies cultivadas, la sacarosa es el principal azúcar translocada (Daie, 1985). La sacarosa entra en el pedúnculo de los frutos donde posteriormente es metabolizada a glucosa y fructosa (Gross y Pharr, 1984). La velocidad de translocación de los asimilados en el floema es determinada frecuentemente por gradientes de concentración de solutos o de turgencia potencial entre la fuente y los órganos demandantes ubicados al final del floema (Ho, 1979; Patrick, 1988).

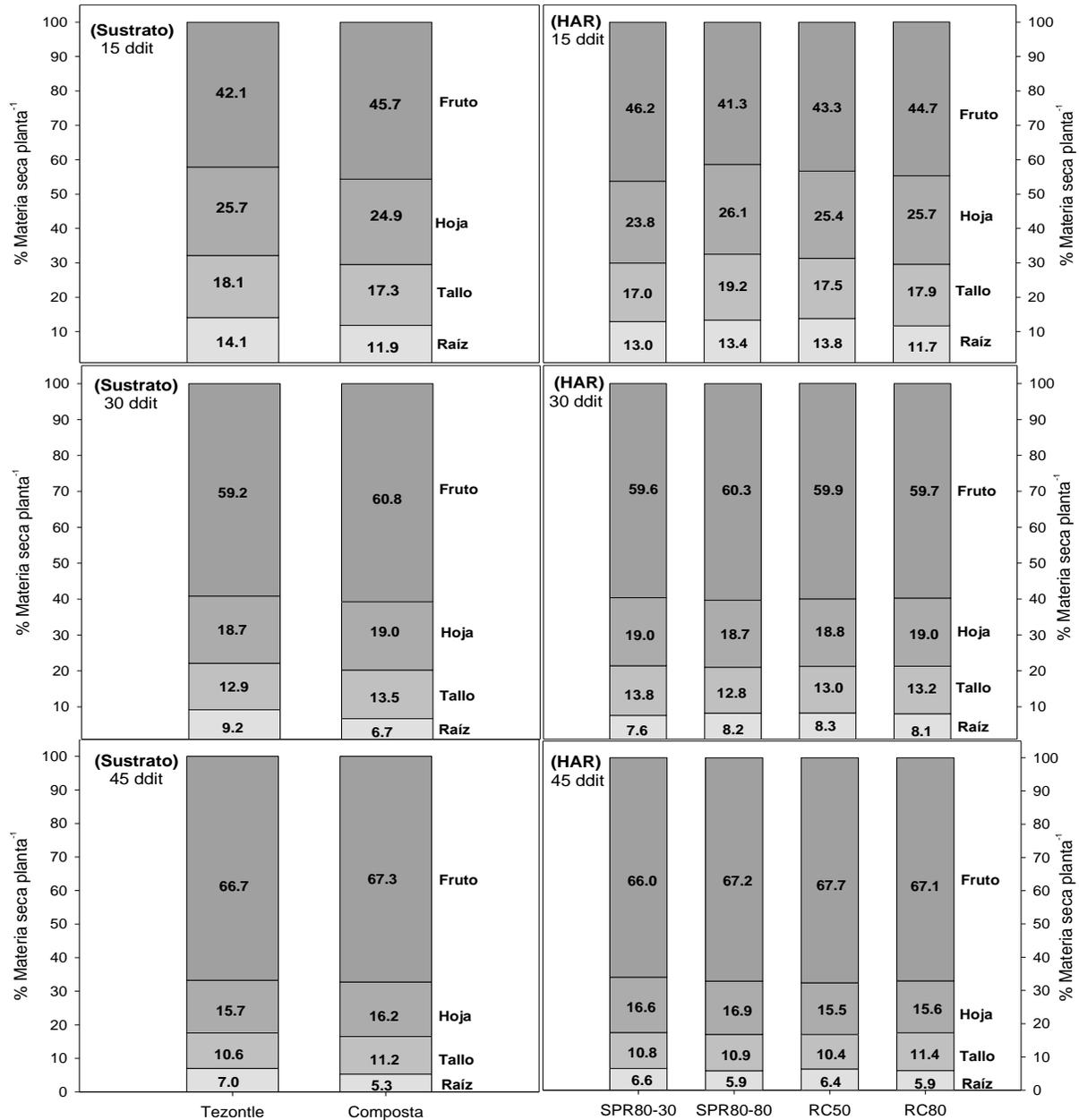


Figura 5.22. Distribución de la materia seca total de la planta de pimiento morrón entre sus diferentes órganos (raíz, tallo, hoja y fruto) en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes ≥ 80 %; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes ≥ 80 % (lado húmedo) y el otro ≥ 30 % (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 80 % y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 50 %], durante el periodo experimental

En la Figura 5.22 observamos que la diferencia en la ganancia de materia seca entre órganos es más pequeña en comparación al comportamiento presentado con la materia fresca. Sin embargo, la acumulación diaria de materia seca en la planta en relación a la del fruto (1.77 g) sigue siendo consistentemente mayor al de las hojas (0.18 g) y el tallo (0.11 g) comportamiento similar al encontrado por Maher (1976) en plantas de tomate. Al respecto, Hurd *et al.* (1979) menciona que cuando el suministro de asimilados es limitado, el fruto toma muchos de los asimilados disponibles ocasionando inhibición en el desarrollo de flores, brotes y raíces en menor medida.

Al igual que en la proporción de materia fresca, el sustrato afectó mayormente la asignación de materia seca en la raíz durante el periodo experimental. En tezontle las raíces representaron el 14.1, 9.2 y 7.0 % de la materia seca total por planta, biomasa mayor a 11.9, 6.7 y 5.3 % obtenida en composta a los 15, 30 y 45 ddit, respectivamente. La menor asignación de fotosintatos hacia las raíces indujo que éstos se distribuyeran hacia los demás órganos observándose un ligero aumento en la materia seca del tallo, hoja y fruto en plantas cultivadas en composta.

Respecto al factor HAR, éste influyó ligeramente en la distribución de los asimilados en las plantas, así tenemos que las raíces crecidas con el menor nivel de HAR (RC50) recibieron cantidad mayor de fotosintatos durante todo el periodo experimental en relación a la cantidad asignada a este órgano por plantas cultivadas con los mayores niveles de HAR. Para lograr un rápido crecimiento inicial de las plantas jóvenes, es importante un incremento substancial de la superficie foliar en esta fase, debido a que gran parte de la radiación solar incidente no es interceptada. Por lo tanto, en esta fase, una gran parte de los asimilados deben ser destinados a la formación de las hojas. Al respecto, el porcentaje de materia seca dirigida a las hojas, tallo, y frutos fue similar entre los diferentes niveles de HAR implementados. A los 45 ddit el fruto de plantas bajo SPR80-30, SPR80-80, RC50 y RC80 representó el 66.0, 67.2, 67.7 y 67.1 % respectivamente, de la materia seca total de la planta (Figura 5.22), resultados similares a los reportados para tomate por Ehret y Ho (1986) quienes encontraron que el peso de todos los frutos representa entre el 52 y

72 % del peso seco total acumulado por planta. Cantore *et al.* (2000) y Dorji *et al.* (2005) por su parte reportaron en Chile 39 y 55 %, respectivamente bajo SPR valores inferiores a los encontrados en la presente investigación.

En general, observamos que varios órganos demandantes tienen habilidades diferentes para captar asimilados (fuerza de demanda), y así la prioridad de un órgano en la recepción de asimilados, es el resultado de la competencia entre los órganos demandantes (competencia de la demanda). Esta prioridad es mejor evaluada por la distribución proporcional de asimilados cuando el suministro de éstos es limitado, como la mayor proporción de asimilados será tomado por el demandante fuerte, los demandantes débiles pueden o no recibir asimilados, dependiendo de su disponibilidad (Ho, 1984).

5.9 Materia fresca y seca total

Los datos reportados para estas variables presentaron diferencias estadísticas significativas (Cuadro 11-A). La mayor evapotranspiración de las plantas en tezontle resultado de la mayor distribución y actividad del sistema radical provocó un aumento ($P \leq 0.05$) de 1.8, 9.0 y 8.8 % en la materia fresca acumulada por planta en relación a la obtenida por plantas en composta a los 15, 30 y 45 ddit, respectivamente. La tasa diaria de producción de materia fresca total alcanzada en tezontle fue de 24.5 g pl^{-1} y en composta de 21.1 g pl^{-1} (Figura 5.23A), a estos ritmos de producción se alcanzaron biomásas frescas de 1392.7 y 1279.7 g pl^{-1} en tezontle y composta, respectivamente, a los 45 ddit (Figura 5.24A).

Los niveles de HAR en que las plantas se desarrollaron influyeron notablemente en la producción de la materia fresca total por planta, así tenemos que las plantas con raíz dividida y SPR siempre representaron los pesos frescos más grandes durante el periodo experimental (Cuadro 11-A). La HAR más alta (SPR80-80) produjo estadísticamente la mayor biomasa fresca total con 702.9 , 1104.6 y 1457.9 g pl^{-1} , a los 15, 30 y 45 ddit, respectivamente, biomasa 13.2, 20.2 y 27.2 % mayor a la obtenida por plantas bajo la HAR más baja (RC50). Un hallazgo verdaderamente importante fue que las plantas bajo secado parcial de la raíz

(SPR80-30) lograron acumular significativamente mayor materia fresca total (666.9, 1092.7 y 1399.2 g pl⁻¹) durante los tres muestreos realizados cuando se comparó con su testigo el RC80 (618.0, 1046.1 y 1341.3 g pl⁻¹) que recibió (P≤0.01) mayor cantidad de agua, resultados similares a los encontrados en peral, duraznero, tomate y manzano (Kang *et al.*, 2002; Goldhamer *et al.*, 2002; López *et al.*, 2008 y Zegbe y Serna, 2009), quienes reportaron que bajo SPR las plantas produjeron el mismo rendimiento e incluso lo mejoró en comparación al obtenido bajo riego comercial.

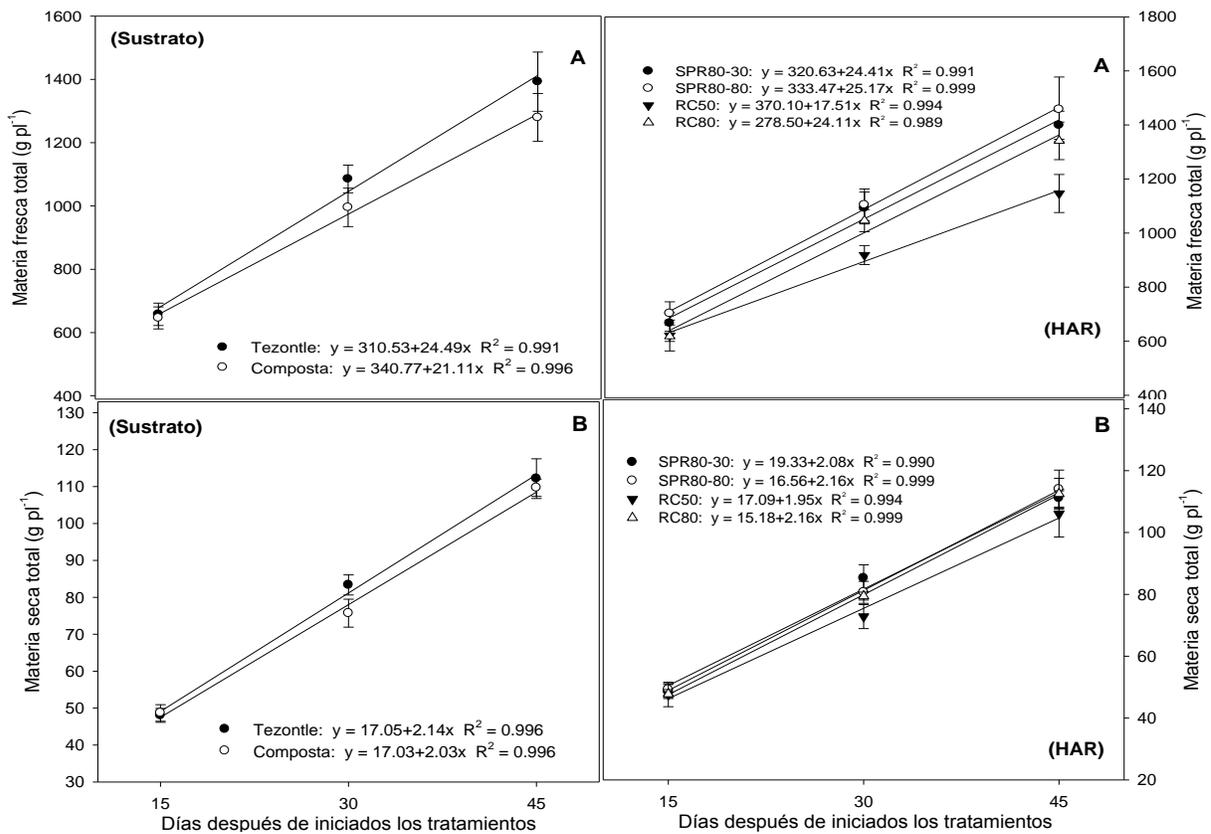


Figura 5.23. Comportamiento de la materia fresca (A) y seca (B) total (g pl⁻¹) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes ≥80 %; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes ≥80 % (lado húmedo) y el otro ≥30 % (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥80 % y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥50 %], durante el periodo experimental

A los 45 ddit, la materia fresca total alcanzada fue de 1.46, 1.40, 1.34 y 1.15 kg pl^{-1} bajo SPR80-80, SPR80-30, RC80 y RC50, respectivamente (Figura 5.24A), resultado de la mayor tasa diaria de producción (25.17 g) obtenida en SPR80-80, en relación con la formada por SPR80-30 (24.41 g), RC80 (24.11 g) y RC50 (17.51 g) (Figura 5.23A).

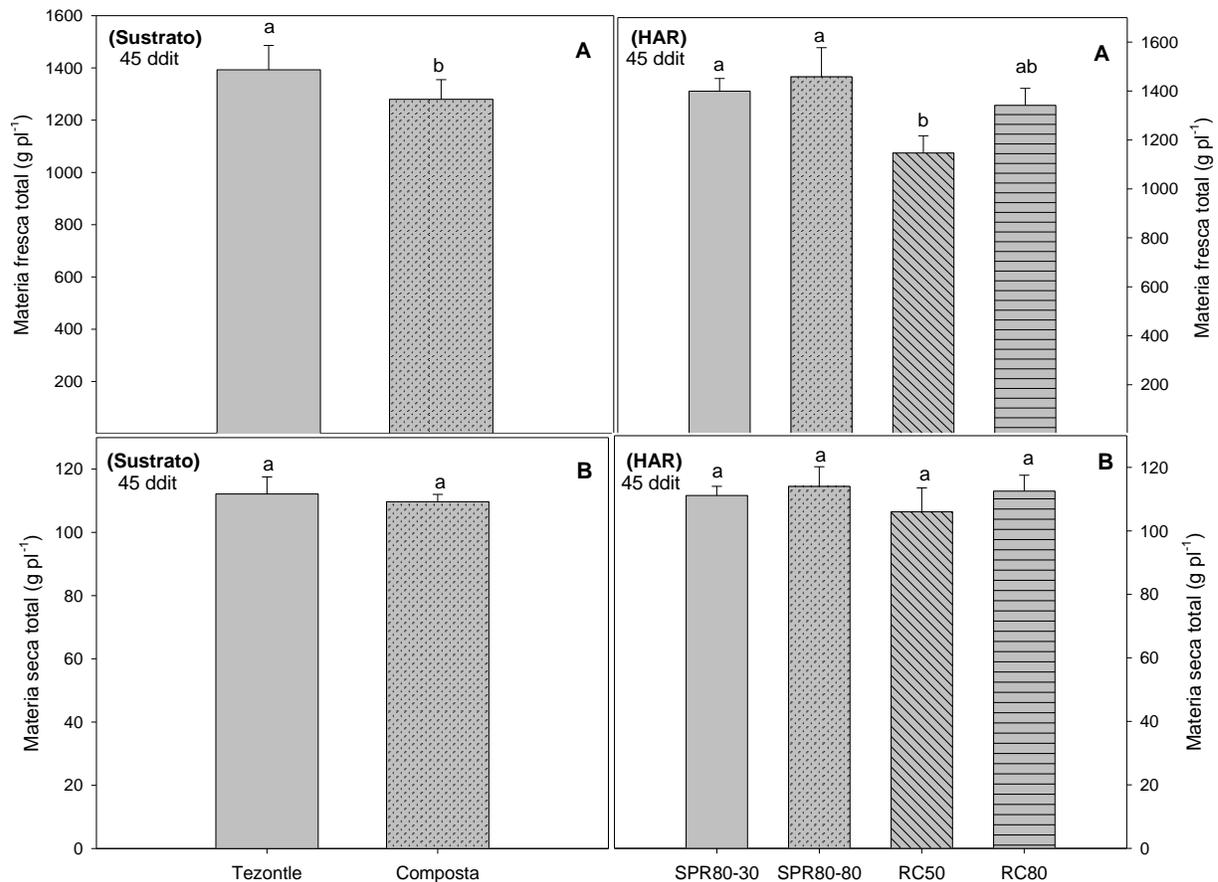


Figura 5.24. Materia fresca (A) y seca (B) total ($g\ pl^{-1}$) de plantas de pimienta morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes $\geq 80\%$; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes $\geq 80\%$ (lado húmedo) y el otro $\geq 30\%$ (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 80\%$ y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato $\geq 50\%$], a los 45 días de haber iniciado los tratamientos (ddit). Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$) según la prueba de Tukey

El sustrato de cultivo afectó estadísticamente la cantidad de materia seca total por planta sólo a los 30 ddit (Cuadro 11-A). La mayor materia fresca total obtenida en tezontle se correlacionó positivamente con la mayor materia seca total presente en estas plantas en relación a la formada en composta. Aunque fue poca la diferencia en la tasa de producción entre ambos sustratos, las plantas en tezontle diariamente formaron ligeramente mayor materia seca total (2.14 g), en relación a 2.03 g obtenida por plantas en composta (Figura 5.24B), comportamiento que provocó que a los 45 ddit las plantas en tezontle pesaran 112.16 g pl^{-1} , 2.2 % mayor al peso seco total de las plantas en composta (Figura 5.23B).

La producción de materia seca total se comportó de manera similar a la materia fresca total por efecto del nivel de HAR en que las plantas se desarrollaron (Cuadro 11-A), aunque en menor proporción. En términos generales, la mayor cantidad de materia seca total fue formada por plantas con raíz dividida y bajo SPR en comparación a la obtenida bajo riego convencional (raíz completa), principalmente a los 15 y 30 ddit. Al final del periodo experimental el SPR80-80 provocó 7.5 % mayor acumulación de materia seca total en relación a la cantidad de fotosintatos acumulados bajo RC50, sin embargo esta diferencia no fue estadísticamente significativa. Mientras que, bajo SPR80-30 y RC80 las plantas asimilaron similar cantidad de fotosintatos obteniendo biomásas secas de 111.14 y 112.52 g pl^{-1} , respectivamente (Figura 5.24B). Las ganancias diarias de materia seca total fueron del orden de 2.16, 2.16, 2.08 y 1.95 g en SPR80-80, RC80, SPR80-30 y RC50, respectivamente (Figura 5.23B). Resultados similares fueron obtenidos por Dorji *et al.* (2005), López *et al.* (2008) y Zegbe y Serna (2009) en plantas de chile, tomate y manzano bajo SPR y RC, reportando diferencias estadísticas no significativas al comparar la materia seca total bajo estas dos técnicas de riego.

5.10 Calidad del fruto

La calidad de un producto es la combinación de atributos o caracteres que éste presenta y es determinada por el grado de aceptación del consumidor. Los consumidores miden la calidad del fruto principalmente por tres factores: la apariencia física (color, tamaño, forma, ausencia de defectos, etc.), textura (firmeza,

frescura, jugosidad, etc.) y sabor (dulzura, acidez, aroma, etc.) (Jones, 1999); sin embargo, la calidad nutricional es importante porque los frutos frescos son fuentes de vitaminas (A, B, C, tiaminas, niacinas) minerales y fibra (Kader, 1986).

5.10.1 Firmeza (Newton)

La calidad externa es una característica esencial a tener en cuenta y tan importante como la productividad del cultivar utilizado. Una de las características de mayor importancia es la firmeza, es decir, atributo que confiere a los frutos una larga duración después de ser recolectados y, determina en gran medida la decisión del consumidor de compra del producto. El sustrato de cultivo afectó significativamente la firmeza de los frutos (Cuadro 12-A). A los 45 ddit los frutos provenientes de plantas crecidas en tezontle fueron 16.6 % más firmes, en relación a la firmeza obtenida en frutos de plantas cultivadas en composta (7.99 N) (Figura 5.25).

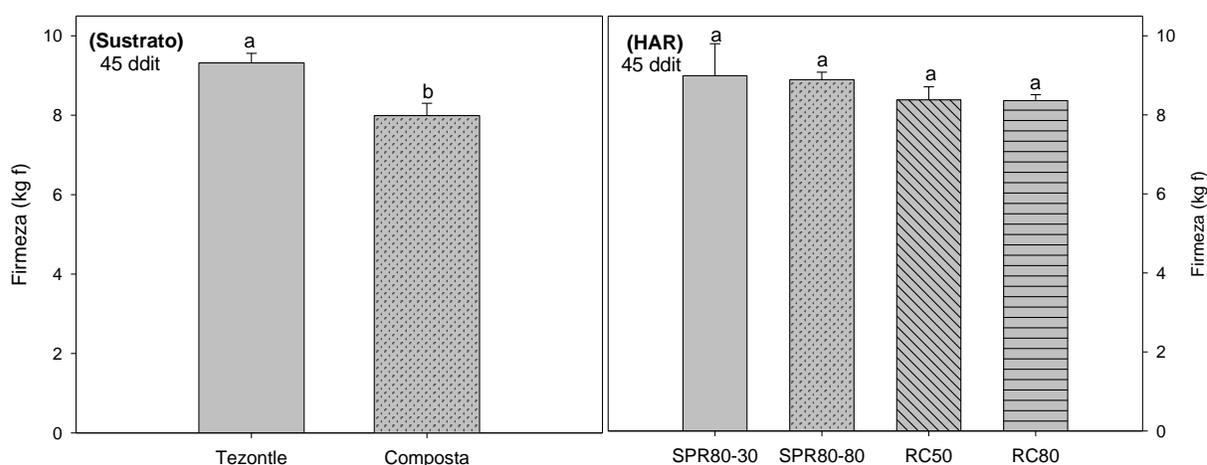


Figura 5.25. Calidad de los frutos de pimiento morrón en términos de firmeza (Newton) en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes ≥ 80 %; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes ≥ 80 % (lado húmedo) y el otro ≥ 30 % (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 80 % y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 50 %], a los 45 días de haber iniciado los tratamientos (ddit). Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$) según la prueba de Tukey

Este comportamiento podría explicarse por las características físicas del tezontle que permitieron mayor distribución y actividad del sistema radical que asociado a una nutrición balanceada aplicada continuamente a la planta, permitió responder en forma más oportuna y precisa a los requerimientos nutrimentales (principalmente del calcio que está asociado directamente a una mayor vida postcosecha de los frutos) para cada etapa fenológica del cultivo con el consecuente mejoramiento de la producción y calidad de los frutos como reportado por varios investigadores (Zapata, 1990; Gurovich, 2000), quienes con fertirrigación permanente lograron mejorar la calidad de los frutos de frambuesa debido a la mejor distribución de la aplicación de los nutrimentos durante el ciclo de cultivo, caso contrario observaron con el suministro de los nutrimentos en una sola aplicación. En este mismo sentido, Cook y Sanders (1991) y Thompson *et al.* (2003) determinaron que el riego es una forma efectiva de aplicar los nutrimentos y que las aplicaciones frecuentes son más beneficiosas en suelos arenosos y bajos en materia orgánica, debido a la menor interacción con los coloides del suelo en relación a suelos con altos contenidos de materia orgánica como en composta. En nuestra investigación las características físicas de la composta provocó una actividad y distribución menor del sistema radical con la consecuente menor absorción de agua y exploración de los nutrimentos presentes (principalmente los que se mueven mayormente por flujo de masas como el calcio) que dio origen a frutos menos firmes. Factores no nutricionales también pueden influir en la firmeza del fruto, como las condiciones climáticas y estado hídrico del fruto al momento de la cosecha (Robbins y Moore, 1991).

La HAR en el sustrato de cultivo tuvo un efecto estadístico no significativo en la firmeza de los frutos (Cuadro 12-A). En términos generales, frutos procedentes de plantas con raíz dividida y secado parcial de la raíz fueron ligeramente más firmes, en relación a los obtenidos bajo riego convencional. Uno de los beneficios del riego reducido, es la mejora en la calidad del fruto (Behboudian y Mills, 1997). Al respecto, la firmeza de los frutos de plantas bajo SPR80-30 (8.99 N) tuvo un ligero aumento no significativo de 1.1, 7.5 y 7.3 % cuando se comparó con los frutos procedentes de plantas bajo SPR80-80, RC80 y RC50, respectivamente (Figura 5.25). Resultados

similares fueron obtenidos por López *et al.* (2008) y Campos *et al.* (2009) quienes en plantas de tomate bajo SPR obtuvieron frutos 31 y 37 % estadísticamente más firmes, respecto al testigo con riego convencional. Según Gómez y Camelo (2002) la pérdida de firmeza es resultado de la acción de tres enzimas principales (celulasa, pectinesterasa y poligalacturonasa), cuyas actividades quizá se modifiquen en respuesta a los cambios de humedad en el suelo.

5.10.2 Sólidos solubles totales (°Brix)

No se detectaron diferencias significativas en el contenido de sólidos solubles totales (SST) por efecto del sustrato utilizado (Cuadro 12-A). Sin embargo, los frutos provenientes de plantas en tezontle tuvieron 7.9 % mayor SST en comparación a frutos de plantas en composta que alcanzaron 6.92 °Brix (Figura 5.26).

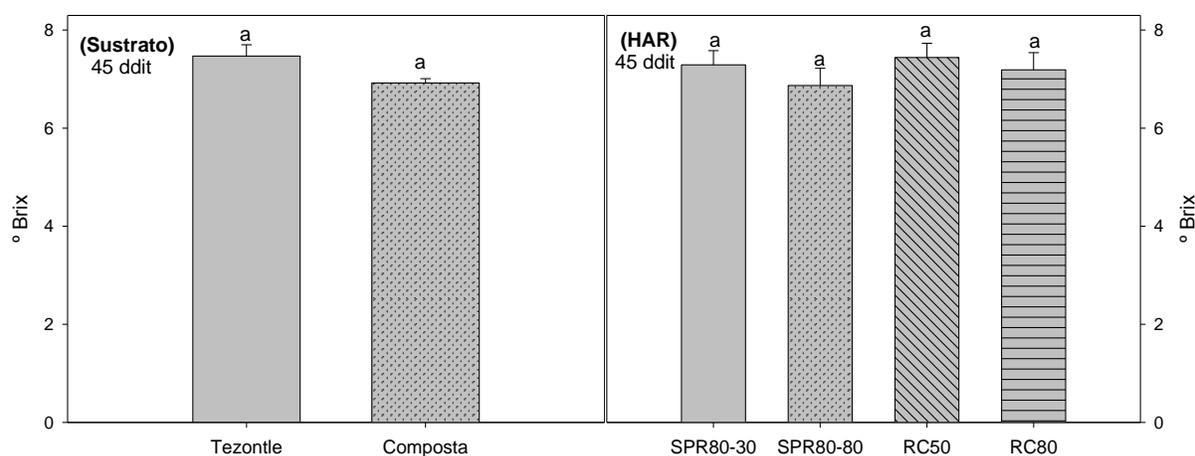


Figura 5.26. Calidad de los frutos de pimiento morrón en términos de sólidos solubles totales (°Brix) en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes ≥ 80 %; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes ≥ 80 % (lado húmedo) y el otro ≥ 30 % (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 80 % y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 50 %], a los 45 días de haber iniciado los tratamientos (ddit). Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$) según la prueba de Tukey

Los niveles de HAR influyeron de forma no significativa en la cantidad de SST presente en los frutos (Cuadro 12-A). El incremento de SST parece estar asociada con la reducción del contenido de agua en el fruto (Adams y Ho, 1989) y al incremento en la acumulación de azúcares (Mitchell *et al.*, 1991). Al respecto, una disminución del contenido de agua en el fruto de 33.8 % bajo RC50 cuando se comparó al SPR80-80, produjo una concentración de SST de 7.44 °Brix, valor 2.0, 3.5 y 8.3 % mayor al obtenido en SPR80-30, RC80 y SPR80-80, respectivamente (Figura 5.26) que significativamente contenían cantidad mayor de agua en el fruto. Al comparar el contenido de SST de frutos bajo SPR80-30 y su testigo (RC80) este fue estadísticamente similar con valores de 7.29 y 7.19 °Brix. La superior firmeza y SST en fruto bajo SPR80-30 son indicativos de buena calidad y vida de anaquel más larga que son importantes para el consumo de pimiento como una verdura fresca como reportado por Dorji *et al.* (2005).

Estos resultados difieren de estudios previos en tomate en los que fueron determinados aumentos significativos en el contenido de los sólidos solubles en el fruto en diferentes esquemas de riego bajo SPR (Loveys *et al.*, 1998; Dry y Loveys, 1998; Stoll *et al.*, 2000; Davies *et al.*, 2000; Zegbe-Domínguez *et al.*, 2003; Stikic *et al.*, 2003; López *et al.*, 2008). En experimentos con tomate Davies *et al.* (2000) y Kirda *et al.* (2004) encontraron en las plantas con secado parcial de la raíz una disminución significativa del tamaño y materia fresca del fruto, que aunada al mantenimiento en la acumulación de biomasa en frutos de menor tamaño, se reflejó en un aumento del 16 y 21 % del contenido de sólidos solubles totales comparado al riego completo. Resultados semejantes a los encontrados en la presente investigación fueron encontrados en plantas de manzano y tomate bajo SPR (Zegbe *et al.*, 2006; Zegbe *et al.*, 2007; Campos *et al.*, 2009) sin diferencias significativas en el contenido de SST (°Brix).

5.11 Eficiencia en el uso del agua (EUA)

5.11.1 EUA obtenida de la materia fresca del fruto

La evapotranspiración de las plantas en composta fue de 14.1, 24.8 y 33.2 L pl⁻¹, a los 15, 30 y 45 ddit, respectivamente, 23.9, 35.9 y 41.9 % menor a la

evapotranspirada por las plantas en tezontle. Esto ocasionó que las plantas en composta utilizaran eficientemente la menor agua recibida presentando un aumento significativo del 32.6, 17.0 y 18.1 % en la EUA (Cuadro 13-A), con una ligera ganancia de 20.0 g pl⁻¹ (15 ddit) y pérdidas de 63.13 y 87.7 g pl⁻¹ (30 y 45 ddit) en la materia fresca del fruto, cuando se comparó con la obtenida en plantas en tezontle. Al final del periodo experimental (45 ddit) la EUA fue de 31.31 y 26.51 g L⁻¹ de la materia fresca de fruto en composta y tezontle, respectivamente (Figura 5.27).

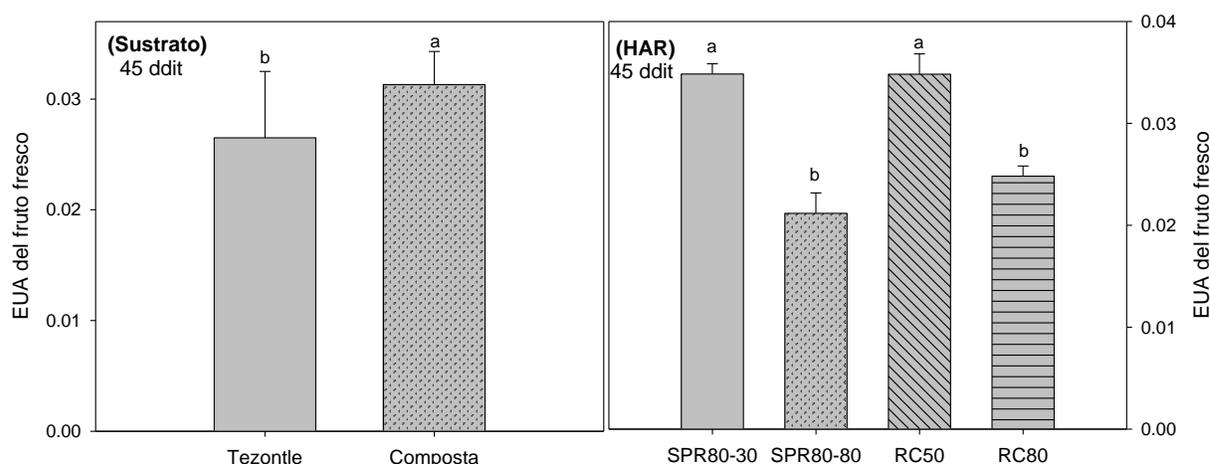


Figura 5.27. Eficiencia en el uso del agua (EUA) obtenida de la materia fresca del fruto de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes ≥ 80 %; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes ≥ 80 % (lado húmedo) y el otro ≥ 30 % (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 80 % y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 50 %], a los 45 días de haber iniciado los tratamientos (ddit). Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$) según la prueba de Tukey

La EUA cambió significativamente por efecto del nivel de HAR en que las plantas estuvieron creciendo durante el periodo experimental (Cuadro 13-A). En general, las plantas cultivadas con la menor cantidad de agua resultado de los niveles de HAR más bajos (RC50 y SPR80-30) y en composta produjeron ($P \leq 0.01$) la mayor materia fresca de fruto por unidad de agua evapotranspirada, en relación con

la EUA en plantas bajo los niveles de HAR más altos (RC80 y SPR80-80). En RC50 se obtuvo 96.6, 84.5 y 64.5 % mayor EUA en relación con la obtenida en SPR80-80 a los 15, 30 y 45 ddit, respectivamente. Sin embargo, tuvo disminuciones significativas de 11.6, 22.0 y 31.6 % en la materia fresca de los frutos. En el nivel de HAR con secado parcial de la raíz (SPR80-30) fue evidente la mayor EUA, en relación con su testigo con riego convencional (RC80); a pesar que las plantas bajo SPR80-30 crecieron con 35.3, 38.8 y 43.2 % menor cantidad de agua aplicada lograron una EUA 40.9, 38.8 y 40.4 % y rendimiento 10.1, 5.2 y 3.2 % mayor a la obtenida bajo RC80, a los 15, 30 y 45 ddit, respectivamente. Al final del periodo experimental la EUA fue de 34.85, 34.82, 24.82 y 21.17 g L⁻¹ de materia fresca de fruto en SPR80-30, RC50, RC80 y SPR80-80, respectivamente (Figura 5.27).

5.11.2 EUA obtenida de la materia fresca total

Esta variable tuvo el mismo comportamiento al encontrado en la EUA obtenida de la materia fresca del fruto por efecto del sustrato de cultivo. Las plantas en composta siempre obtuvieron las EUA estadísticamente más altas en comparación a la encontrada en tezontle durante el periodo experimental (Cuadro 14-A). A los 45 ddit la EUA en composta fue 0.0336, 17.9 % significativamente mayor en comparación con la obtenida en tezontle, con una disminución ($P \leq 0.05$) de 8.8 % de la materia fresca total por planta (Figura 5.28).

Los niveles de HAR afectaron la EUA obtenida de la materia fresca total por planta durante el periodo experimental (Cuadro 14-A). En términos generales, la combinación entre los niveles de HAR más bajos (RC50 y SPR80-30) y la composta produjeron ($P \leq 0.01$) la mayor EUA, en relación a la encontrada en plantas cultivadas en tezontle y bajo los niveles de HAR más altos (RC80 y SPR80-80). El menor consumo de agua por las plantas en RC50 originó 93.3, 87.3 y 70.0 % mayor EUA en relación con la obtenida en SPR80-80 a los 15, 30 y 45 ddit, respectivamente, con 13.2, 20.2 y 27.2 % significativamente menor materia fresca total por planta. Los beneficios obtenidos con el SPR mejoró ($P \leq 0.01$) la EUA bajo el nivel de HAR SPR80-30 en 39.5, 37.6 y 42.5 % y la materia fresca total en 7.9, 4.4 y 4.3 % cuando se comparó con su testigo con riego convencional (RC80), a los 15, 30 y 45 ddit,

respectivamente. Al final del periodo experimental la EUA fue de 44.06, 45.06, 30.91 y 26.51 g L⁻¹ de la materia fresca total por planta en SPR80-30, RC50, RC80 y SPR80-80, respectivamente (Figura 5.28).

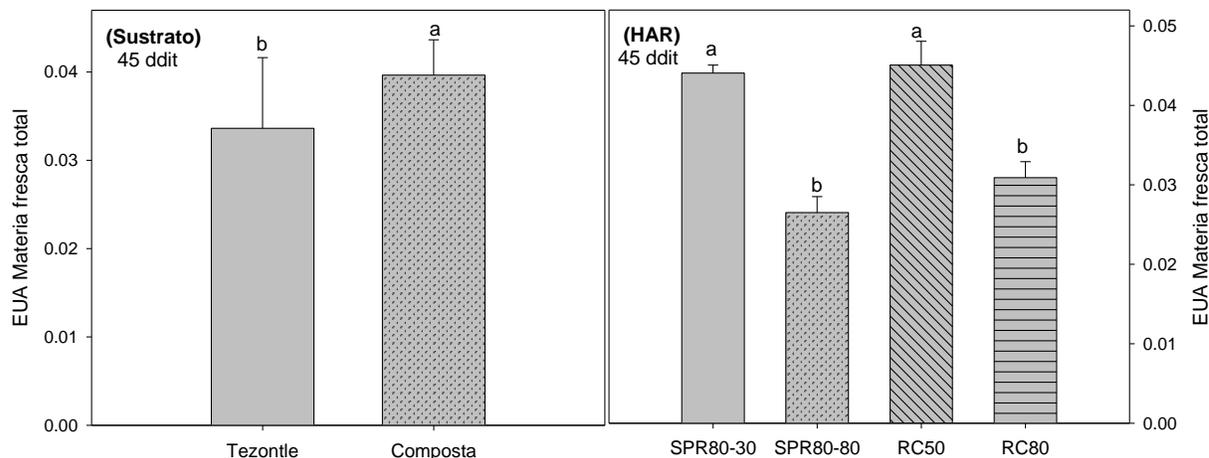


Figura 5.28. Eficiencia en el uso del agua (EUA) obtenida de la materia fresca total de plantas de pimienta morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR) [SPR80-80, con raíz dividida y HAR en el sustrato en ambos recipientes ≥ 80 %; SPR80-30, con raíz dividida y HAR en el sustrato en uno de los recipientes ≥ 80 % (lado húmedo) y el otro ≥ 30 % (lado seco), con ciclos de alternancia de 15 d; testigo (RC80) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 80 % y, testigo (RC50) con el sistema radical completo “riego convencional” y HAR en el sustrato ≥ 50 %], a los 45 días de haber iniciado los tratamientos (ddit). Mismas literales entre tratamientos son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$) según la prueba de Tukey

Es importante hacer notar que el secado parcial de la raíz (SPR80-30) mejoró significativamente la EUA en un 40.4 y 42.5 % obtenida de la materia fresca del fruto y total por planta, respectivamente y, ahorró 43.2 % de agua con ligero aumento en el rendimiento en relación al obtenido en plantas bajo riego convencional (RC80). Este ahorro de agua es mayor al 30-35 % obtenido por Kang y Zhang (2004) y Liu *et al.* (2006), similar al 40-44 % obtenido por Kang *et al.* (2001), Zegbe *et al.* (2006) y Leib *et al.* (2006), pero menor al 50 % obtenido por Loveys *et al.* (1997), Dry y Loveys (1998), Stoll *et al.* (2000), Davies *et al.* (2002), van Hooijdonk *et al.* (2004),

Dorji *et al.* (2005), Zegbe *et al.* (2007) y Zegbe y Serna (2009) bajo SPR con una ligera o nula disminución en el rendimiento.

La mejora en la eficiencia en el uso del agua en plantas bajo SPR puede ser el resultado del cierre parcial del estoma (During *et al.*, 1996). Provocado por el aumento de la concentración de ABA (producido por las raíces bajo sequía) en el xilema que fluye en la planta hasta los brotes (Zhang y Davies, 1990; Gollan *et al.*, 1992), lo que permite a la planta usar el agua eficientemente proporcionada parcialmente a través de las raíces humedecidas. Mientras el cierre parcial del estoma reduce la transpiración, la turgencia de la hoja se mantiene y la fotosíntesis es afectada en menor medida (Jones, 1992). Al respecto, Kang y Zhang (2004) mencionan que en un sistema de riego normal, los estomas operan para la mayoría del tiempo a su completa magnitud y asimilación (un estado de lujo) mientras que, cuando los estomas están parcialmente cerrados (inducido por señales de estrés hídrico) se reduce sólo una pequeña proporción de la asimilación total. Esto puede explicar la naturaleza mejorada de la EUA normalmente vista sin mucha pérdida de producción de la biomasa. Tal comportamiento sólo es evidente bajo SPR (Jones, 1980; Cowan, 1982) ya que las plantas bajo la práctica de riego deficitario, no tienen los mecanismos de control estomático hormonal, que bajo estrés hídrico puede producir pérdida de turgencia de la hoja que afecta adversamente la fotosíntesis.

VI. CONCLUSIONES

En base a los objetivos planteados y resultados obtenidos en esta investigación se concluye lo siguiente:

- ◆ El tezontle fue el mejor sustrato de cultivo (con una proporción adecuada de aireación), pues indujo una distribución y actividad radical 53.1 % mejorada que aumentó significativamente la cantidad de agua evapotranspirada por estas plantas en un 41.9 %.
- ◆ Plantas en tezontle presentaron 14.8 y 19.2 % mayor potencial de agua de la hoja (Ψ_{hoja}) y eficiencia en el uso del agua instantánea (EUAI), respectivamente, que se correlacionó positivamente con un aumento en el rendimiento obtenido de 8.6 %.
- ◆ La calidad del fruto en términos de firmeza y sólidos solubles totales ($^{\circ}\text{Brix}$) fue significativamente mayor en plantas cultivadas en tezontle.
- ◆ Plantas en composta aumentaron significativamente la eficiencia en el uso del agua (EUA) en un 18.1 %, obtenida de la materia fresca de los frutos.
- ◆ La composta logró satisfacer la demanda nutrimental de las plantas de pimiento morrón en 2.5 meses, con un ahorro de 24.779 L pl^{-1} de solución nutritiva durante el periodo experimental.
- ◆ El SPR80-30 permitió reducir la cantidad y frecuencia de los riegos necesarios para reponer el reservorio hídrico, generando así un ahorro en el agua de riego utilizada hasta del 43.2 %.
- ◆ El SPR80-30 estimuló el sistema de señales químicas entre la raíz y el vástago que propició el cierre parcial de los estomas, mantenimiento del Ψ_{hoja} y poco efecto en el intercambio de gases, reflejándose en un aumento de 4.3 y 40.4 % en cuanto a la materia fresca total y eficiencia en el uso del agua (EUA) se refiere, respectivamente con un ligero aumento en el rendimiento y calidad del fruto en relación a su testigo bajo riego convencional y evapotranspiración más alta (RC80).

- ◆ La mayor asignación de materia fresca hacia el fruto se presentó en los niveles de HAR más altos (SPR80-30, SPR80-80 y RC80). Sin embargo, la materia seca del fruto, hoja y tallo fue similar entre las plantas de los distintos niveles de HAR. La mayor translocación de asimilados hacia la raíz se logró en SPR80-30 y RC50 (niveles de HAR más bajos).
- ◆ Los mayores rendimientos se obtuvieron bajo SPR y el tezontle como sustrato de cultivo y, los menores rendimientos se obtuvieron bajo RC50 y la composta como sustrato.

VII. RECOMENDACIONES

- ◆ Realizar mezclas de la composta con otros sustratos para mejorar los niveles de aireación e inducir una mayor distribución y actividad del sistema radical con un consecuente aumento en la exploración de agua y nutrimentos presentes en el sustrato que aumentaría sin duda el rendimiento de las plantas bajo este sustrato de cultivo.
- ◆ Observar el efecto del SPR durante todo el ciclo de cultivo del pimiento morrón para conocer el comportamiento de las plantas a largo término.

VIII. LITERATURA CITADA

- Abad, M. 1991. Los sustratos hortícolas y las técnicas de cultivo sin suelo. *En*: L. Rallo y F. Nuez (Eds.). La Horticultura Española en la C.E. Ediciones de Horticultura S.L., Reus (Tarragona). pp. 270-280.
- Abad, M. 1995. Sustratos para el cultivo sin suelo. *En*: F. Nuez (Coord.). El Cultivo del Tomate. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. pp. 131-166.
- Abad, M. y Noguera, P. 1998. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. *En*: C. Cadahía (Coord.). Fertirrigación. Cultivos Hortícolas y Ornamentales. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. pp. 287-342.
- Abad, M. y Noguera, P. 2000. Los sustratos en los cultivos sin suelo. *En*: Manual de cultivo sin suelo. M. Urrestarazu (ed). 2da. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. pp. 137-185.
- Abad, M.; Martínez, P., F.; Martínez, M., D. y Martínez, J. 1993. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. *Actas de Horticultura*, 11:141-154.
- Adams, M., W. 1982. Plant architecture and yield breeding. *Iowa State Journal of Research*. 56(3):225-254.
- Adams, P. and Ho, L., C. 1989. Effects of constant and fluctuating salinity on the yield, quality and calcium status of tomatoes. *J. Hortic. Sci.* 64:725-732.
- Adams, P. and Ho, L., C. 1992. The susceptibility of modern tomato cultivars to blossom-end rot in relation to salinity. *Journal of Horticultural Science* 67:827-839.
- Adler, P., M. 1992. Porous media: geometry and transports. Butterworth-Heinemann. Stoneham, M.A. USA. 235 p.

- Aguilar, M., L.; Espadas, F., L.; Coello, J.; Maust, B., E.; Trejo, C.; Robert, M., L. and Santamaria, J., M. 2000. The role of abscisic acid in controlling leaf water loss, survival and growth of micropropagated *Tagetes erecta* plants when transferred directly to the field. *J. Exp. Bot.* 51:1861-1866.
- Aloni, B.; Daie, J. and Karni, L. 1991. Water relations, photosynthesis and assimilate partitioning in leaves of pepper (*Capsicum annum*) transplants: Effects of water stress after transplanting. *J. Hort. Sci.* 66:75-80.
- Aloni, B.; Karni, L.; Rylski, I.; Cohen, Y.; Lee, Y.; Fuchs, M.; Moresht, S. and Yaho, C. 1999. Cuticular cracking in bell pepper fruit: II. Effects of fruit water relations and fruit expansion. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 74(1):1-5.
- Álvarez, L., R. and Caula, B. 1993. Morphological effects of variable levels of root restriction on loring and red haven peaches in different environments. *Hort. Science* 28:556.
- Ameglio, T.; Archer, P.; Cohen, M.; Valancogne, C.; Daudet, F. and Cruiziat, P. 1999. Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Plant Soil* 207:155-167.
- André, J., P. 1987. Propriétés chimiques des substrats. *In*: D. Blanc (Dir.). *Les Cultures Hors Sol*. 2ème éd. Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Paris. pp. 127-152.
- Ansorena, J. 1994. *Sustratos. Propiedades y Caracterización*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. 172 p.
- Antonio, R., O. 2000. Caracterización fenológica, morfológica y análisis de crecimiento del chile (*Capsicum annum* L.) bajo condiciones de invernadero en Chapingo. Tesis de Licenciatura. Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. México. pp. 4-5.

- Arizaleta, M. y Pire, R. 2008. Respuesta de plántulas de cafeto al tamaño de la bolsa y fertilización con nitrógeno y fósforo en vivero. Nota en *Agrociencia* 42:47-55.
- Atkinson, D. 1980. The distribution and effectiveness of the roots of the crops. *Hort. Rew.* 2:424-490.
- Auge, R., M. and Moore, J., L. 2002. Stomatal response to nonhydraulic root-to-shoot communication of partial soil drying in relation to foliar dehydration tolerance. *Environ. Exp. Bot.* 47:217-229.
- Ayers, R., S. y Westcot, D., W. 1987. La calidad del agua y su uso en la agricultura. Estudio FAO. Riego y Drenaje 29 rev. 1. Trad. Al español por J. F. Alfaro de: *Water quality and use in agriculture.* 174 p.
- Baber, L., D.; Gardner, W., H. y Gardner, W., R. 1991. Retención del agua del suelo. En: *Física de Suelos.* Grupo Noriega Editores. Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana S.A. de C. V. México. pp. 299-334.
- Bacon, M., A. 2004. Water use efficiency in plant biology. En: *Water use efficiency in plant biology* (ed. Mark A. Bacon). Blackwell Publishing Ltd., London, UK. pp. 1-26.
- Baker, S., S.; Wilhelm, K., S. and Thomashow, M., F. 1994. The 5'-region of *Arabidopsis thaliana* cor15a has cis-acting elements that confer cold, drought and ABA regulated gene expression. *Plant Mol. Biol.* 24:701-713.
- Bangerth, F. 1979. Calcium-related physiological disorders of plants. *Annual Review Phytopathology* 17:97-122.
- Barrs, H., D. 1968. Effect of cyclic variation in gas exchange under constant environmental conditions on the ratio of transpiration to net photosynthesis. *Physiol. Plant.* 21:918-929.
- Bar-Tal, A.; Bar-Yosef, B. and Kafkafi, U. 1990. Pepper transplant response to root volume and nutrition in the nursery. *Agron. J.* 82:989-995.

- Bar-Yosef, B.; Schwartz, S.; Markovich, T.; Lucas, B. and Assaf, R. 1988. Effect of root volume and nitrate solution concentration on growth, fruit yield, and temporal N and water uptake rates by apple trees. *Plant Soil* 107:49-56.
- Behboudian, M., H.; Lawes, G., S. and Griffiths, K., M. 1994. The influence of water deficit on water relations, photosynthesis and fruit growth in Asian pear (*Pyrus serotina* Rehd.). *Scientia Horticulturae* 60:89-99.
- Behboudian, M., H. and Mills, T., M. 1997. Deficit irrigation in deciduous orchards. *Horticultural Reviews* 21:105-131.
- Bennie, A., T. 1996. Growth and mechanical impedance. *In: Waisel, Eshel Y. A., and U. Kafkafi (eds). Plant Roots. The Hidden Half. Marcel Dekker, New York. pp: 453-470.*
- Bilderback, T., E. and Fonteno, W., C. 1991. Effects of container geometry and media physical properties on air and water volumes in containers. *J. Environ. Hort.* 5:180-182.
- Blackman, P., G. and Davies, W., J. 1985. Root to shoot communication. *J. Exp. Bot.*, 36:39-48.
- Blake, G., R. and Hartge, K., H. 1986. Particle Density. *In: Arnold Klute, (Eds.) Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin USA. pp. 377-382.*
- Bohnert, H., J.; Nelson, D., E. and Jeensen, R., G. 1995. Adaptations to environmental stresses. *Plant Cell* 7:1099-1111.
- Bohnert, H., J.; Thomas, J., C.; DeRocher, E., J.; Michalowski, C., B.; Breiteneder, H.; Vernon, D., M.; Deng, W.; Yamada, S. and Jensen, R., G. 1994. Responses to salt stress in the halophyte *Mesembrianthemum crystallinum*. *In: Biochemical and Cellular Mechanisms of Stress Tolerance in Plants (Cherry, J.H., ed.) Springer-Verlag, Berlin, pp. 415-428.*

- Bohnert, H., J. and Jensen, R., G. 1996. Strategies for engineering water-stress tolerance in plants. *Trends Biotechnol.* 14:89-96.
- Botella, O. y Campos, Y. 1993. El agua en la planta. *En: Agronomía del riego.* Ed. Mundiprensa. Madrid, España. 732 p.
- Boyer, J., S. 1970. Differing sensitivity of photosynthesis to low leaf water potentials in corn and soybean. *Plant Physiology* 46:236-239.
- Brix, H. 1962. The effect of water stress on the rates of photosynthesis and respiration in tomato plants and loblolly pine seedlings. *Physiol. Plant.* 15:10-20.
- Bunt, A., C. 1961. Some physical properties of pot plant compost and their effect on plant growth I. Bulky physical conditioners. *Plant and soil* 4:322-32.
- Bunt, A., C. 1988. *Media and Mixes for Container-Grown Plants.* 2nd ed. Unwin Hyman Ltd., London, 309 p.
- Burés, S. 1997. Características de los sustratos. *Sustratos. En: Sustratos.* Ediciones Agrotécnicas S.L. Madrid. pp. 49-154.
- Bustamante, O., J. D. 2001. Bioespacios y la modificación microclimática, alternativa de control del "chino" en jitomate (*L. esculentum* Mill.) y otras hortalizas. *Simposium el "chino" del jitomate. Horticultura Mexicana* 8 (3):22-27.
- Cabrera, R., I. 1999. Propiedades, uso y manejo de sustratos de cultivo para la producción de plantas en maceta. *Revista Chapingo - Serie Horticultura.* 5(1): 5-11.
- Cadahía, C. (Coord.). 1988. *Fertilización en Riego por Goteo de Cultivos Hortícolas.* Unión Explosivos Río Tinto S.A., Madrid, 234 p.
- Cadahía, C. 1995. Fertilización. *En: F. Nuez (Coord.). El Cultivo del Tomate.* Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. pp. 167-187.

- Cadahía, C. y Fernández, M. 1992. Evaluación de los fertilizantes de liberación lenta: Ensayos de invernadero. *En*: S. Jiménez (Coord.). Fertilizantes de Liberación Lenta. Tipos, Evaluación y Aplicaciones. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. pp. 111-126.
- Caldari, J., P. 2007. Manejo de la luz en Invernaderos. Los beneficios de luz de calidad en el cultivo de hortalizas. 1er. Simposio Internacional de Invernaderos. México, D. F. 5 p.
- Cantliffe, D., J. 1993. Pre and postharvest practices for improved vegetable transplant quality. *Hort. Technology* 3:415-417.
- Cantore, V.; Boari, F. and Caliandro, A. 2000. Effect of split-root-system water stress on physiological and morphological aspects of pepper (*Capsicum annuum* L.). *Acta Hort.* 537:321-328.
- Campos, G., H.; Trejo, C.; Peña, V., C.; Ramírez, A., C. and Sánchez, G., P. 2009. Effect of partial rootzone drying on growth, gas exchange, and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Scientia Horticulturae* 120:493-499.
- Carmi, A.; Hesketh, J., D.; Enos, W., T. and Peters, D., B. 1983. Interrelationships between shoot growth and photosynthesis as affected by root growth restriction. *Photosynthetica* 17:240-245.
- Carmi, A. and Heuer, B. 1981. The role of roots in control of bean shoot growth. *Ann. Bot.* 48:419-527.
- Castellanos, J., Z. y Vargas, T., P. 2004. El uso de sustratos en la horticultura bajo invernadero. *En*: Manual de producción hortícola en invernadero. J. Z. Castellanos (ed). 2ª ed. INTAGRI. México. pp. 124-150.
- Castillo, E., A.; Quarín, H., S. e Iglesias, C., M. 2000. Caracterización química y física de composta de lombrices elaborados a partir de residuos orgánicos puros y combinados. *Agricultura Técnica (Chile)* 60:74-79.

- CENIAP. 2000. Monografías del Chile. Agroclimatología. *En:* www.ceniap.gob.ve/bdigital/monografias/morfologia/fenologia (Consultado el 13-02-09).
- Chandler, D.; Seyfried, M.; Murdock, M. and McNamara, J. 2004. Field calibration of water content reflectometers. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1501-1507.
- Chaves, M., M.; Osório, J. and Pereira, J., S. 2004. Water use efficiency and photosynthesis. *En: Water use efficiency in plant biology* (ed. Mark A. Bacon). Blackwell Publishing Ltd., London, UK. pp. 42-74.
- Chaves, M., M.; Pereira, J., S.; Maroco, J.; Rodrigues M., L.; Ricardo, C., P. P. and Osorio, M., L. 2002. How plants cope with water stress in the field. *Photosynthesis and growth. Annual Botany.* 89:907-916.
- Chen, Y.; Banin, A. and Ataman, Y. 1980. Characterization of particles and pores, hydraulic properties and water–air ratios of artificial growth media and soils. *ISOSC Proc.* pp. 63-81.
- CNA. 2005. Estadísticas del agua en México. Comisión Nacional del Agua. México. pp. 23-34.
- CNA. 2006. Estadísticas del agua en México, 2004. Comisión Nacional del Agua. México. pp. 23-111.
- Cochran, H., L. 1936. Some factors influencing growth and fruit-setting in the pepper (*Capsicum frutescens* L.). *Cornell agric. Expt. Stn. Mem* 190, 29 p.
- Comas, L., H. and Eissenstat, D. 2000. Assessing root death and root system dynamics in a study of grape canopy pruning. *New Phytologist* 147:171-178.
- Comas, L., H.; Anderson, I., J.; Dunst, R., M.; Lakso, A., N. and Eissenstat, D., M. 2005. Canopy and environmental control of root dynamics in a long-term study of concord grape. *New Phytologist* 167(3):829-840.

- Cook, W., P. and Sanders, D., C. 1991. Nitrogen application frequency for drip-irrigated tomatoes. *Hort Science* 26(3):250-252.
- Correia, M., J. and Pereira, J., S. 1995. The control of leaf conductance of white lupin by xylem ABA concentration decreases with the severity of water deficits. *J. Exp. Bot.* 46:101-110.
- Cowan, I., R. 1977. Stomatal behavior and environment. *In: Advances in Botanical Research* (eds R.D. Preston & H.W. Woolhouse), pp: 117-228, Academic Press, New York and London.
- Cowan, I., R. 1982. Regulation of water use in relation to carbon gain on higher plants. pp. 589-614. *In: O.L. Lange et al. (eds.), Physiological Plant Ecology*, vol. 2. Springer, Berlin.
- Csizinszky, A., A. and Schuster, D., J. 1988. Impact of insecticide schedule, N and K rates, and transplant container size on cauliflower yield. *Applied Agr. Res.* 3:12-16.
- Csizinszky, A., A. and Schuster, D., J. 1993. Impact of insecticide schedule, N and K rates, and transplant container size on cabbage yield. *Hort. Science* 28:299-301.
- Daie, J. 1985. Carbohydrate partitioning and metabolism in crops. *Horticultural Review*, 7:69-108.
- Davies, W., J. and Zhang, J. 1991. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annual Review of plant Physiology and Plant Molecular Biology* 42:55-76.
- Davies, W., J.; Bacon, M., A.; Thompson, D., S.; Sobeih, W. and Rodriguez, L., G. 2000. Regulation of leaf and fruit growth in plants growing in drying soil: exploitation of the plants chemical signaling system and hydraulic architecture to increase the efficiency of water use in agriculture. *Journal of Experimental Botany* 51:1617-1626.

- Davies, W., J.; Tardieu, F. and Trejo, C., L. 1994. How do chemical signals work in plants that grow in drying soil? *Plant Physiol.* 104:309-314.
- Davies, W., J.; Wilkinson, S. and Loveys, B. 2002. Stomatal control by chemical signaling and the exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in agriculture. *New Phytologist* 153:449-460.
- Debaeke, P. and Aboudrare, A. 2004. Adaptation of crop management to water limited environments. *Europ. J. Agronomy* 21:433-446.
- De Boodt, M. 1975. Caractères physiques et disponibilité en eau des substrats. *Annales de Gembloux* 81:59-72.
- De Boodt, M. and De Waele, N. 1968. Study on the physical properties of artificial soils and the growth of ornamental plants. *Pedologie XVIII* 3:275-300.
- De Boodt, M. and Verdonck, O. 1972. The physical properties of the substrates in horticulture. *Acta Horticulturae* 26:37-44.
- De Boodt, M.; Verdonck, O. and Cappaert, I. 1974. Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Horticulturae* 37:2054-2062.
- De Grazia, J.; Tittonell, A., P. and Chiesa, A. 2006. Efecto de sustratos con compost y fertilización nitrogenada sobre la fotosíntesis, precocidad y rendimiento de pimiento (*Capsicum annuum*). *Ciencia e Investigación Agraria*, 34(3):195-204.
- Delfine, S.; Tognetti, R.; Loreto, F. and Alvino, A. 2002. Physiological and growth responses to water stress in field grown bell pepper (*Capsicum annuum* L.). *J. Hort. Sci. Biotech.* 77:697-704.
- De Pascale, S.; Ruggiero, C.; Barbieri, G. and Maggio, A. 2003. Physiological responses of pepper to salinity and drought. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 128:48-54.
- Dodd, I., C.; Stikic, R. and Davies, W., J. 1996. Chemical regulation of gas exchange and growth of plants in drying soil in the field. *J. Exp. Bot.* 47:1475-1490.

- Dorji, K.; Behboudian, M., H. and Zegbe-Domínguez, J., A. 2005. Water relations, growth, yield and fruit quality of hot pepper under deficit irrigation and partial rootzone drying. *Scientia Horticulturae* 104:137-149.
- dos Santos, T., P.; Lopes, C., M.; Rodrigues, M., L.; de Souza, C., R.; Maroco, J., P.; Pereira, J., S.; Silva, J., R. and Chaves, M., M. 2003. Partial rootzone drying: effects on fruit growth and quality of field grown grapevines (*Vitis vinifera*). *Funct. Plant Biol.* 30:663-671.
- Dry, P., R. and Loveys, B., R. 1998. Factors influencing grapevine vigour and the potential for control with partial rootzone drying. *Aust. J. Grape Wine Res.* 4:140-148.
- Dufault, R., J. and Waters, L., Jr. 1985. Container size influences broccoli and cauliflower transplant growth but not yield. *Hort. Science* 20:682-684.
- During, H.; Loveys, B., R. and Dry, P., R. 1996. Root signals affect water use efficiency and shoot growth. In: Pioni, S.; Peterlunger, E.; Lacono, F. and Intriari, C. (eds.), *Proc. Workshop strategies to optimize wine grape quality. Acta Horticulturae (Belgium)* 427:1-13.
- Eghball, B. 2000. Nitrogen mineralization from field-applied beef cattle feedlot manure or compost. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:2024-2030.
- Ehlers, W.; Khosla, B., K.; Kopke, U.; Stulpnagel, R.; Bohm, W. and Baeumer, K. 1980. Tillage effects on root development, water uptake and growth of oats. *Soil Till. Res.*, 1:19-34.
- Ehret, D., J. and Ho, L., C. 1986. The effects of salinity on dry matter partitioning and fruit growth in tomatoes grown in nutrient film culture. *Journal of Horticultural Science*, 61:361-367.
- FAO. 2003. Descubrir el potencial del agua para la agricultura. Dirección de Desarrollo de Tierras y Aguas (AGLW) de la FAO. 62 p. *En:* <http://www.atl.org.mx/files/InformaciónGeneralAgricultura/5.pdf>.

- Ferreyra, E., R.; Selles, V., G.; Maldonado, B., P.; Celedón, de A., J. y Gil, M., P. 2007. Efecto del clima, de las características de la hoja y de la metodología de medición en el potencial hídrico xilemático en palto (*Persea americana* Mill.). Agricultura Técnica (Chile) 67(2):182-188.
- Flocker, W., J.; Tamm, H. and Vomocil, J., A. 1960. Effect of soil compaction on tomato and potato yields. Agronomy Journal 52:345-348.
- Fonteno, W., C. 1989. An approach to modeling air and water status of horticultural substrates. Acta Horticulturae 238:67-74.
- Fonteno, W., C. 1993. Problems & considerations in determining physical properties of horticultural substrates. Acta Horticulturae 342:197-204.
- Fonteno, W., C.; Cassel, D., K. and Larson, R., A. 1981. Physical properties of three container media and their effect on poinsettia growth. Journal American Society for Horticultural Sciences 106(6):736-741.
- Gallardo, M.; Turner, N., C. and Ludwig, C. 1994. Water relations, gas exchange and abscisic acid content of *Lupinus cosentinii* leaves in response to drying different proportions of the root system. J. Exp. Bot. 45:908-918.
- Garnier, E. and Berger, A. 1987. The influence of drought on stomatal conductance and water potential on peach trees growing in the field. Sci. Hortic. 32:249-263.
- Gil, C., R. 2007. El ambiente del suelo y el crecimiento de la raíces. *En*: Información técnica de trigo y otros cultivos de invierno. Publicación Miscelánea N° 107. INTA – Estación Experimental Agropecuaria Rafaela.
- Goldhamer, D., A.; Salinas, M.; Crisosto, C.; Day, K., R.; Soler, M. and Moriana, A. 2002. Effects of regulated deficit irrigation and partial rootzone drying on late harvest peach tree performance. Acta Horticulturae 592:343-350.
- Gollan, T.; Passioura, J., B. and Munns, R. 1992. Soil-water status affect the stomatal conductance of fully turgid wheat and sunflower leaves. Aust. J. Plant Physiol. 13:459-464.

- Gómez, P., A. y Camelo, A., F. L. 2002. Calidad postcosecha de tomates almacenados en atmósferas controladas. *Horticultura Brasileira* 20:38-43.
- Gowing, D., J. G.; Davies, W., J. and Jones, H., G. 1990. A positive rootsourced as an indicator of soil drying in apple, *Malus x domestica* Borkh. *Journal of Experimental Botany* 41(233):1535-1540.
- Grassi, C., J. 1975. Estimación de los usos consuntivos de agua y requerimientos de riego con fines de formulación y diseños de proyectos. Criterios y procedimientos. CIDIAT, Mérida, Venezuela.
- Green, S., R.; Clothier, B., E. and Macleod, D., J. 1997. The response of sap flow in apple roots to localized irrigation. *Agric. Water Manage.* 33:63-78.
- Green, S., R. and Clothier, B., E. 1999. Roots water dynamics of water uptake by a mature apple tree. *Plant Soil* 206:61-77.
- Gross, K., C. and Pharr, D., M. A. 1982. Potential pathway for galactose metabolism in *Cucumis sativus* L., a stachyose transporting species. *Plant Physiology*, 69:117-121.
- Gurovich, L. 2000. Manejo del agua y la nutrición en las variedades nuevas de frambuesas. Seminario Frambuesas en Chile: Variedades y Manejo de Huertos. Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Santiago, Chile. pp. 46-56.
- Hall, M., R. 1989. Cell size of seedling containers influences early vine growth and yield of transplanted watermelon. *Hort. Science* 24:771-773.
- Hamdy, A.; Ragab, R. and Scarascia-Mugnozza, E. 2003. Coping with water scarcity: water saving and increasing water productivity. *Irrigation and Drainage* 52:3-20.
- Hameed, M., A.; Reid, J., B. and Rowe, R., N. 1987. Root confinement and its effects on water relations, growth and assimilate partitioning of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Ann. Bot.* 59:685-692.

- Han, Y., L. and Kang, S., Z. 2002. Effects of the controlled partial rootzone irrigation on root nutrition uptake of maize (*Zea mays*). Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineers 18(1):57-59.
- Handreck, K., A. and Black, N., D. 1991. Growing Media for Ornamental Plants and Turf. New South Wales University Press, Kensington (Australia). 401 p.
- Hanson, A. and Hitz, W. 1982. Metabolic responses of mesophytes to plant water deficits. Ann. Rev. Plant Physiol. 33:163-203.
- Hashemimajd, K.; Kalbasi, M.; Golchin, A. and Shariatmadari, H. 2004. Comparison of vermicomposta and compost as potting media for growth of tomatoes. Journal of Plant Nutrition 27:1107-1123.
- Heeb, A.; Lundegardh, B.; Ericsson, T. and Savage, G., P. 2005. Effects of nitrate - ammonium-, and organic -nitrogen- based fertilizers on growth and yield of tomatoes. J. Plant Nutr. Soil Sci. 168:123-129.
- Hillel, D. 1980. Applications of soils physics. Academic Press. New York, USA. 385 p.
- Ho, L., C. 1979. Regulation of assimilate translocation between leaves and fruits in the tomato. Annual of Botany, 43:437-448.
- Ho, L., C. 1984. Partitioning of assimilates in fruiting tomato plants. Plant Growth Reg., 2:277-285.
- Horton, R.; Beese, F. and Wierenga, P. 1982. Physiological response of Chile Pepper to trickle irrigation. Agronomy J. 74:551-554.
- Hsiao, T., C. 1973. Plant responses to water stress. Ann. Rev. Plant Physiol. 24:519-570.
- Hsiao, T., C. 1990. Plant-atmosphere interactions, evapotranspiration and irrigation scheduling. Acta Horticulturae 278:55-66.
- Hsiao, T., C. and Acevedo, E. 1974. Plant responses to water deficits, water use efficiency and drought resistances. Agric. Meteorol., 14:59-84.

- Huang, B. and Gao, H. 2000. Root physiological characteristics associated with drought resistance in tall fescue cultivars. *Crop Sci.* 40:196-203.
- Hurd, R., G.; Gay, A., P. and Mountifield, L. 1979. The effect of partial flower removal on the relation between root, shoot and fruit growth in the indeterminate tomato. *Annual of Applied Biology*, 93:77-89.
- IFA. 2006. <http://www.fertiliser.org/ifa/publicat/html/pubman/peppers.htm>.
- INEGI. 1998. Informe de la situación general en material de equilibrio ecológico y protección al ambiente, 1995-1996. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. pp. 158-161.
- Instruction manual. 1996. CS615 Water content reflectometer. Campbell Scientific, Inc. 9 p.
- Ismail, M., R. and Davies, W., J. 1998. Root restriction affects leaf growth and stomatal response: the role of xylem sap ABA. *Scientia Horticulturae* 74:257-268.
- Jia, W.; Zhang, J. and Zhang, D., P. 1996. Metabolism of xylem-delivered ABA in relation to ABA flux and concentration in leaves of maize and *Commelina communis*. *J. Exp. Bot* 47:1085-1091.
- Johnson, J., D. and Ferrell, W., K. 1983. Stomatal response to vapour pressure deficit and the effect of plant water stress. *Plant, Cell and Environment*, 6:451-456.
- Jones, H., G. 1980. Interaction and integration of adaptive responses to water stress: the implications of an unpredictable environment. pp. 353–365. *In*: N.C. Turner and P.J. Kramer (eds.), *Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress*. Wiley, New York.
- Jones, H., G. 1992. *Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press.

- Jones, H., G. 2004. What is water use efficiency? *In: Water use efficiency in plant biology* (ed. Mark A. Bacon). Blackwell Publishing Ltd., London, Uk. pp. 27-41.
- Jones, J., B. 1999. *Tomato plant cultural in the field, greenhouse and home garden*. Ed. CRC. USA. 199 p.
- Kader, A., A. 1986. Effects of posharvest handling procedures on tomato quality. *Acta Horticulturae* 190:209-217.
- Kaiser, W., M. 1987. Effects of water deficit on photosynthetic capacity. *Physiol. Plant.* 71:142-149.
- Kang, S. and Zhang, J. 2004. Controlled alternate partial root-zone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency *J. Exp. Bot* 55: 2437-2446.
- Kang, S.; Hu, X.; Goodwin, I. and Jerie, P. 2002. Soil water distribution, water use, and yield response to partial root zone drying under shallow groundwater table condition in a pear orchard. *Scientia Horticulturae* 92:277-291.
- Kang, S.; Li, Z., J.; Hu, X., T.; Jerie, P. and Zhang, L. 2001. An improved water use efficiency for hot pepper grown under controlled alternate drip irrigation on partial roots. *Sci. Hort.* 89:257-267.
- Kang, S.; Liang, Z.; Hu, W. and Zhang, J. 1998. Water use efficiency of controlled alternate irrigation on root-divided maize plant. *Agricult Water Manag*, 38:69-76.
- Kang, S.; Zhang, L.; Hu, X.; Li, Z. and Jerie, P. 2001. An improved water use efficiency for hot pepper grown under controlled alternate drip irrigation on partial roots. *Scientia Horticulturae* 89:257-267.
- Katerji, N.; Mastrorilli, M. and Hamdy, A. 1993. Effects of water stress at different growth stages on pepper yield. *Acta Hort.* 335:165-171.

- Kemble, J., M.; Davis, J., M.; Gardner, R., G. and Sanders, D., C. 1994. Root cell volume affects growth of compact –growth- habit tomato transplants. Hort. Science 29:261-262.
- Khalil, A. and Grace, J. 1993. Does xylem sap ABA control the stomatal behavior of water stressed sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.) seedlings? J. Exp. Bot 44:1127-1134.
- Khah, E., M. K.; Koukoufikis, A., G.; Mavromatis, D.; Chachalis, C. and Goulas, K. 2007. The effect of different techniques on plant performance and seed quality in relation to fruit maturation and storage of different genotypes of pepper (*Capsicum annuum* var. *annuum* L.). J. Food Agric. Environ. 5:159-163.
- Kirda, C.; Cetin, M.; Dasgan, Y.; Topcu, S.; Kaman, H.; Ekici, B.; Derici, M., R. and Ozguven, A., I. 2004. Yield response of greenhouse grown tomato to partial root drying and conventional deficit irrigation. Agric. Water Management 69:191-201.
- Kirda, C.; Topcu, S.; Cetin, M.; Dasgan, H., Y.; Kaman, H.; Topaloglu, F.; Derici, M., R. and Ekici, B. 2007. Prospects of partial root zone irrigation for increasing irrigation water use efficiency of major crops in the Mediterranean region. Ann Appl Biol 150:281-291.
- Kramer, P., J. 1989. Relaciones hídricas de suelos y plantas. Una síntesis moderna. México. Ed. Harla. 538 p.
- Kriedemann, P., E. and Goodwin, I. 2004. Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying. An information package on two irrigation methods for high-input horticulture. Irrigation Insights No. 4. Land and Water. Australia Pub. 102 p.
- Krizek, D., T.; Carmi, A.; Mirecki, R., M.; Snyder, F., W. and Bruce, J., A. 1985. Comparative effects of soil moisture stress and restricted root zone volume on morphogenetic and physiological responses of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). J. Expt. Bot. 36:25-38.

- Korner, C.; Menendez-Reidl, S., P. and John, P., C. L. 1989. Why are Bonsai Plants small? A consideration of cell size. *Aust. J Plant Physiol.* 16:443-448.
- Laborde, C., J. A. 1984. Presente y pasado del chile en México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. México. pp. 19-22.
- Lahav, E. and Kalmar, D. 1992. Water requirements and the effect of salinity in an avocado orchard on clay soil. *Word Avocado Congres II Proceedings.* Orange, California, pp. 323-330.
- Leperen, W., V. S.; Volkov, V., S. and Meeteren, U., V. 2003. Distribution of xylem hydraulic resistance in fruiting truss of tomato influenced by water stress. *Journal of Experimental Botany* 54(381):317-324.
- Liang, J.; Zhang, J. and Wong, M., H. 1996. Effects of air-filled soil porosity and aeration on the initiation and growth of secondary roots of maize (*Zea mays*). *Plant Soil* 186:245-254.
- Lieb, B., G.; Caspari, H., W.; Redulla, C., A.; Andrews, P., K. and Jabro, J., J. 2006. Partial rootzone drying and deficit irrigation of "Fuji" apples in a semi-arid climate. *Irrigation Sci.* 24:85-99.
- Liu, A. and Latimer, J., G. 1995. Root cell volume in the planter flat affects watermelon seedling development and fruit yield. *Hort. Science* 30:242-246.
- Liu, F.; Shahnazari, A.; Andersen, N., M.; Jacobsen, S., E. and Jensen, C., R. 2006. Physiological responses of potato (*Solanum tuberosum* L.) to partial root-zone drying: ABA signalling, leaf gas exchange, and water use efficiency. *Journal of Experimental Botany*, 57(14):3727-3735.
- López-Cortijo, G., I. y Casanova, D. 2000. El riego en América Latina y el Caribe en Cifras. Informe sobre temas hídricos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (Food and Agriculture organization of the united Nations). Roma. 348 p.

- López, P., L.; Cárdenas, N., R.; Lobit, P.; Martínez, C., O. and Escalante, L., O. 2005. Selección de un sustrato para el crecimiento de fresa en hidroponía. *Rev. Fitotec. Méx.* 28(2):171-174.
- López, O., A. 2007. Señales químicas en plantas de jitomate (*Lycopersicon esculentum*, Mill) y su potencial para incrementar la eficiencia en el uso del agua. Tesis de Doctorado. Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados, México. 142 p.
- López, O., A.; Trejo, L., C.; Peña, V., C. B.; Ramírez, A., C.; Tijerina, Ch., L. and Carillo, S., J. A. 2008. Secado parcial de la raíz de jitomate: efectos en la fisiología de la planta y calidad de fruto. *Agricultura Técnica en México* 34(3):297-302.
- Loveys, B., R.; Grant, J.; Dry, P., L. and McCarthy, M. 1997. Progress in the development of partial rootzone drying. *Australian Grapegrower and Winemaker* 403:18-20.
- Loveys, B., R.; Stoll, M.; Dry, P., R. and McCarthy, M., G. 1998. Partial rootzone drying stimulates stress responses in grapevine to improve water use efficiency while maintaining crop yield and quality. *The Australian Grapegrower and Winemaker* pp. 108-113.
- Loveys, B., R.; Stoll, M.; Dry, P., R. and McCarthy, M., G. 2000. Using plant physiology to improve the water use efficiency of horticultural crops. *Acta Horticulturae* 537:187-197.
- Loveys, B., R.; Stoll, M. and Davies, W., J. 2004. Physiological approaches to enhance water use efficiency in agriculture: exploiting plant signaling in novel irrigation practice. *In: Water use efficiency in plant biology* (ed. Mark A. Bacon). Blackwell Publishing Ltd., London, UK. pp. 113-141.
- Luvaha, E. 2005. Effect of water stress on the growth of mango (*Mangifera indica* L.) rootstock seedlings. M. Sc. Thesis, Maseno University, Kenya.

- Maher, M., J. 1976. Growth and nutrient content of glasshouse tomato crop grown in peat. *Sci. Horticulturae*, 4:23-26.
- Márquez, H., C. y Cano, R., P. 2005. Producción orgánica de tomate cherry bajo invernadero. *Actas Portuguesas de Horticultura* 5:219-224.
- Martínez, F., X. 1993. Propuesta de metodología para la determinación de las propiedades físicas de los sustratos. *Actas de Horticultura*, 11:55-66.
- Martre, P.; Morillon, R.; Barrieu, F.; North, G., B.; Nobel, P., S. and Chrispeels, M., J. 2002. Plasma membrane aquaporins play a significant role during recovery from water deficit. *Plant Physiol.* 130:2101-2110.
- Marsh, D., B. and Paul, K., B. 1988. Influence of container type and cell size on cabbage transplant development and field performance. *Hort. Science* 23:310-311.
- Maurel, M.; Robin, C.; Simonneau, T.; Loustau, D.; Dreyer, E. and Desprez-Loustau, M., L. 2004. Stomatal conductance and root-to-shoot signalling in chestnut saplings exposed to *Phytophthora cinnamomi* or partial soil drying. *Functional Plant Biology* 31:41-45.
- Maynard, E., T.; Vavrina, C., S. and Scott, W., D. 1996. Containerized muskmelon transplants: Cell volume effects on pre-transplant development and subsequent yield. *Hort. Science* 31:58-61.
- Michelot, P. 1999. Relations substrat - irrigation. *In: P Michelot, C Chambolle (Coord). L'irrigation en pépinière hors sol. Astredor Paris. pp. 19-27.*
- Milks, R.; Fonteno, W., C. and Larson, R., A. 1989. Hydrology of horticultural substrates: I mathematical models for moisture characteristics of horticultural containers media. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 114:48-52.
- Mingeau, M. 1975. Etude de la sensibilité du soja á la sécheresse. *Inf. Techn CETIOM* 47:1-14.

- Mingo, D., M.; Bacon, M., A and Davies, W., J. 2003. Non-hydraulic regulation of fruit growth in tomato plants (*Lycopersicon esculentum* cv Solairo) growing in drying soil. *Journal of Experimental Botany* 54:1205-1212.
- Mingo, D., M.; Theobald, J., C.; Bacon, M., A. and Davies, W., J. and Dodd, I., C. 2004. Biomass allocation in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) plants grown under partial rootzone drying: enhancement of root growth. *Functional Plant Biology* 31:971-978.
- Mitchell, J., P.; Shennan, C.; Grattan, S., R. and May, D., M. 1991. Tomato fruit yields and quality under water deficit and salinity. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 116:215-221.
- Morgan, J., M. 1984. Osmoregulation and water stress in higher plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 35:299-319.
- Munns, R. and King, R., W. 1988. Abscisic acid is not the only stomatal inhibitor in the transpiration stream of wheat plants. *Plant Physiol.*, 88:703-708.
- Murillo, J.; Villafañe, R.; Basso, C. y Trujillo, A. 2008. Evaluación de un equipo de reflectometría de dominio temporal (TDR) para registros de humedad en un suelo franco. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*, 25:211-222.
- Nederhoff, E. 2001. <http://www.redpathaghort.com/bulletins/LightandRadiation.html>.
- NeSmith, D., S.; Bridges, D., C. and Barbour, J., C. 1992. Bell pepper responses to root restriction. *J. Plant Nutr.* 15:2763-2776.
- NeSmith, D., S. 1993. Influence of root restriction on two cultivars of summer squash (*Cucurbita pepo* L.). *J. Plant Nutr.* 16:421-431.
- Nobel, P., S. 1999. *Physicochemical and environmental plant physiology*. 2^a edition. Academic Press. USA. 474 p.

- Nobel, P., S. y Long, P., S. 1988. Estructura del dosel e intercepción de luz. *En: Técnicas en fotosíntesis y bio-productividad*. J. Coombs; D. O. Hall; S. P. Long y J. M. O Scurlock (editores). Edit. Futura S. A. Colegio de Postgraduados, México, pp. 34-41.
- North Carolina State University. 2004. Standards for retail potting soils. Disponible en: <http://www.ncsu.edu/unity/lockers/project/hortsublab/retail/index> (consultada agosto de 2010).
- North, G., B. and Nobel, P., S. 1991. Changes in hydraulic conductivity and anatomy caused by drying and rewetting roots of *Agave deserti* (Agavaceae). *Amer. J. Bot.* 78:906-915.
- Obreza, T., A.; Pitts, D., J.; McGovern, R., J. and Speen, T., H. 1996. Deficit irrigation of micro-irrigated tomato affects yield, fruit quality, and disease severity. *Journal of Production Agriculture* 2:270-275.
- Ouma, G. 2007. Effect of different container sizes and irrigation frequency on the morphological and physiological characteristics of Mango (*Mangifera indica* L.) rootstock seedlings. *International Journal of Botany* 3(3):260-268.
- Palacios, V., E. y Martínez, A. 1978. Respuesta en el rendimiento de los cultivos a diferentes niveles de humedad del suelo, un enfoque metodológico de investigación. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Parcchomchuk, P.; Tan, C., S. and Berard, R., G. 1997. Practical use of time domain reflectometry for monitoring soil water content in microirrigated orchards. *Hort Technology* 7:17-22.
- Passioura, J., B.; Condon, A., G. and Richards, R., A. 1993. Water deficits, the development of leaf area and crop productivity. *In: Smith, J.A.C., Griffiths, H. (Eds.), Water Deficits, Plant Responses from Cell to Community*. Bios Scientific Publishers, pp. 253-264.

- Patrick, J., W. 1988. Assimilate partitioning in relation to crop productivity. HortScience, 23:33-40.
- Pearcy, R., W. 1981. Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and gas exchange of leaves. Plant 153:376-387.
- Petit, J., R.; Jouzel, J.; Raynaud, D.; Barkov, N., I.; Barnola, J., M.; Basile, I.; Bender, M.; Chappellaz, J.; Davis, M.; Delaygue, G.; Delmotte, M.; Kotlyakov, V., M.; Legrand, M.; Lipenkov, V. Y.; Lorius, C.; Pépin, L.; Ritz, C.; Saltzman, E. and Stievenard, M. 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. Nature, 399:429-436.
- Peterson, T., A.; Riensel, M., D. and Krizeki, D., T. 1991. Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill cv. Bett Bush) plant response to root restriction on alteration of plant morphology. J. Exp. Bot., 42:1233-1244.
- Poni, S.; Tagliavini, M.; Neri, D.; Scudellari, D. and Toselli, M. 1992. Influence of root pruning and water stress on growth and physiological factors of potted apple, grape, peach and pear trees. Sc. Hort. 52:223-226.
- Postel, S., L. 1998. Water for food production: will there be enough in 2025? BioScience 48:629-637.
- Prado, F., E.; González, J., A.; Gallardo, M.; Moris, M.; Boero, C. and Kortsarz, A. 1995. Changes in soluble carbohydrates and invertase activity in *Chenopodium quinoa* ("quinoa") developed for saline stress during germination. Current Topics in Phytochem. (Life Sci. Adv.) 14:1-5.
- Prasad, M. and Ní Chualáin, D. 2004. Relationship between particle size and air space of growing media. Acta Horticulturae 648:161-166.

- Prieto, M.; Peñalosa, J.; Sarro, M., J.; Zornoza, P. and Gárate, A. 2003. Growth and nutrient uptake in sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) as affected by the growing season. *In: Proc Int Fert Soc & Dahlia Greidinger Symposium "Nutrient, Substrate and Water Management in Protected Cropping Systems."* Izmir, 7-10 December 2003. pp. 362-365.
- Puustjarvi, V. and Robertson, R., A. 1975. Physical and chemical properties. *In: DWRobinson, JGD Lamb (Eds.) Peat in Horticulture* pp. 23-38.
- Raschke, K. and Hedrick, R. 1985. Simultaneous and independent effects of ABA on stomatal and the photosynthetic apparatus in whole leaves plants, 163:105-118.
- Raviv, M.; Chen, Y. and Inbar, Y. 1986. Peat and peat substitutes as growth media for container grown plant. *In: Y. Chen and Y. Avnimelech (Eds.). The Role of Organic Matter in Modern Agriculture.* Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht (The Netherlands). pp. 257-287.
- Raviv, M.; Medina, S.; Krasnovsky, A. and Ziadna, H. 2004. Organic matter and nitrogen conservation in manure compost for organic agriculture. *Compost Science & Utilization* 12:6-10.
- Raviv, M.; Oka, Y.; Katan, J.; Hadar, Y.; Yogev, A.; Medina, S.; Krasnovsky, A. and Ziadna, H. 2005. High nitrogen compost as a medium for organic container-growth crops. *Bioresource Technology* 96:419-427.
- Raviv, M.; Wallach, R.; Silber, A. and Bar-Tal, A. 2002. Substrates and their analysis. *In: Hydroponic production of vegetable and ornamental.* D. Savvas and H. Passsam (eds). Embryo publications. Athens, Greece. pp: 25-101.
- Regalado, O., M del C. 2002. Valoración de características morfológicas y anatómicas de 10 cultivares de jitomate en hidroponía bajo invernadero. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. 161 p.

- Regan, R. 1999. Nursery Irrigation Scheduling Proc. 2nd Ann. Nursery Growers Short Courses Wilson Ville are. pp. 1-8.
- Rieg, M. and Marra, F. 1993. Responses of young peach trees to root confinement. Hort. Science. 28:527.
- Robbins, J., O. A. and Moore, P., P. 1991. Fruit morphology and fruit strength in a seedling population of red raspberry. Hort. Science 26(3):294-295.
- Rosen, J., C. and Bierman, M., P. 2005. Using manure and compost as nutrient sources for vegetable crops. University of Minnesota, Extension Service. 12 p.
- Ruiz, S., R. 2005. Raíces y condiciones de la fruta. Seminario organizado por Subsole: Alternativas Técnicas en Uva de Mesa II-2005.
- Ruff, M., S.; Krizek, D., T.; Mirecki, R., M. and Inouye, D., W. 1987. Restricted root zone volume: Influence on growth and development of tomato. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 112:763-769.
- Russell, J., E. y Russell, E., W. 1968. Las condiciones del suelo y el crecimiento de las plantas. Trad. De la 6ª. Ed. En inglés por Gaspar González y G. Aguilar, Madrid, España.
- Rylski, I. 1973. Effect of night temperature on shape and size of sweet pepper. (*Capsicum annuum* L.). J. Amer. Soc. Hort. Sci. 98:149-152.
- Rylski, I. and Spigelman, M. 1982. Effect of different diurnal temperature combinations on fruit set of sweet pepper. Sci. Hortic. 17:101-106.
- Saab, I., N.; Sharp, R., E.; Pritchard, J. and Voetberg, G., S. 1990. Increased endogenous abscisic acid maintains primary root growth and inhibits shoot growth of maize seedlings at low water potentials. Plant Physiol. 93:1329-1336.
- Salazar, S. and Cortez, J. 1986. Root distribution of mature avocado trees growing in soil of different texture. California Avocado Society Yearbook 70:165-174.

- Salter, P., J. 1958. The effect of different water-regimes on the growth of plants under glass. IV. Vegetative growth and fruit development in the tomato. *J. Hort. Sci.* 33:1-12.
- Schulze, E. D. 1986. Carbon dioxide and water vapour exchange in response to drought in the atmosphere and in the soil. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 37:247-274.
- Schulze, E., D. 1994. The regulation of plant transpiration: interaction of feedforward, feedback, and futile cycles. *In: Schulze, E.-D. (Ed.), Flux Control in Biological System.* Academic Press, New York, pp. 203-235.
- Schulze, E., D. and Koppers, M. 1979. Short term and long term effects of plant water Deficits on stomatal responses to humidity in (*Coryllus avellana* L.). *Plant*, 146:319-326.
- Schurr, U.; Gollan, T. and Schulze, E., D. 1992. Stomatal response to drying soil in relation to changes in the xylem sap composition of *Helianthus annuus*. II. Stomatal sensitivity to abscisic acid imported from the xylem sap. *Plant Cell Environ.* 15:561-567.
- Serna, P., A.; Zegbe, A., J.; Mena, C., J. y Rubio, D., S. 2008. Sistemas de manejo para la producción sustentable de chile seco cv. "Mirasol". *Sociedad Mexicana de Fitogenética, A. C. Revista Fitotecnia Mexicana*, 31(3):41-44.
- Sharp, R., E.; LeNoble, M., E.; Else, M., A.; Thorne, E., T. and Gherardi, F. 2000. Endogenous ABA maintains shoot growth in tomato independently of effects on plant water balance: Evidence for an interaction with ethylene. *J. Exp. Bot.* 51:1575-1584.
- Sharp, R., E.; Silk, W., K. and Hsiao, T., C. 1988. Growth of the maize primary root at low water potentials. I. Spatial distribution of expansive growth. *Plant Physiol.* 87:50-57.

- Shi, W., J. and Kang, S., Z. 2000. Mechanisms and effects of the controlled alternate partial rootzone irrigation in soil vertical profile for water-saving. Transaction of Chinese Society of Agricultural Engineers, 16(5):11-15.
- Silva, H. y Rodríguez, J. 1995. Fertilización de plantaciones de frutales. De Alfabeta impresores. 519 p.
- Slowik, K.; Labanauskas, C., K.; Stolzy, L., H. and Zentmyer, G., A. 1979. Influence of rootstocks, soil oxygen, soil moisture on the uptake and translocation of nutrients in young avocado plants. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 104(2):172-175.
- Sobeih, W., Y.; Dodd, I., C.; Bacon, M., A.; Grierson, D. and Davies, W., J. 2004. Long-distance signals regulating stomatal conductance and leaf growth in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) plants subjected to partial root-zone drying. Journal of Experimental Botany, 55:2353-2363.
- Solomon, A., M. and Cramer, W. 1993. Biospheric implications of global environmental change. In: A. M. Solomon y H. H. Shugart (Eds.) Vegetation dynamics and global change. London, UK: Chapman & Hall. pp. 25-52.
- Spollen, W., G.; LeNoble, M., E.; Samuels, T., D.; Bernstein, N. and Sharp, R., E. 2000. Abscisic acid accumulation maintains maize primary root elongation at low water potentials by restricting ethylene production. Plant Physiol. 122:967-976.
- Steiner, A., A. 1984. The universal solution. I.S.O.S.C. Proceedings 6th International Congress on Soilles Culture pp. 633-649.
- Steudle, E. 2001. The cohesion-tension mechanism and the acquisition of water by plant roots. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 52: 847-875.

- Stikic, R.; Popovic, S.; Srdic, M.; Savic, D.; Javanovic, Z.; Prokic, L., J. and Zdravkovic, J. 2003. Partial root drying (PRD): a new technique for growing plants that saves water and improves the quality of fruit. *Bulgarian Journal of Plant Physiology. Special Issue.* pp. 164-171.
- Stoll, M.; Loveys, B. and Dry, P. 2000. Hormonal changes induced by partial rootzone drying of irrigate grapevine. *Journal of Experimental Botany* 51:1627-1634.
- Tackett, J., L. and Pearson, R. 1964. Oxygen requirements of cotton seedling roots for penetration of compacted soil ceres. *Soil Science. Society American Proceedings*, 28:600-605.
- Taiz, L. and Zeiger, E. 2002. *Plant Physiology* (3rd. ed.). Sinauer, New York, NY. 623 p.
- Tan, C., S.; Cornelisse, A.; Buttery, B., R. 1981. Transpiration, stomatal conductance, and photosynthesis of tomato plants with various proportions of root system supplied with water. *J. Am. Hort. Sci.* 106:147-151.
- Tardieu, F. and Davies, W., J. 1993. Integration of hydraulic and chemical signaling in the control of stomatal conductance and water status of droughted plants. *Plant Cell Environ.* 16:314-349.
- Terés, V.; Arrieta, V. and Rozas, M. 1995. A method for evaluation of fair volume in substrates. *Acta Horticulturae*, 401:41-48.
- Ternesì, M., A.; Andrade, A., P.; Jorriñ, J. and Benlloch, M. 1994. Root-shoot signalling in sunflower plants with confined root systems. *Plant Soil*, 166:31-36.
- Thompson, T., L.; White, S., A.; Walworth, J. and Sowe, G., J. 2003. Fertigation frequency for subsurface drip-irrigated broccoli. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:910-918.
- Tonutti, P. and Giulivo, C. 1990. Effect of available soil volume on growth of young kiwi plants. *Acta Hort.* 282:283-294.

- Trejo, L., C.; Clephan, A., L. and Davies, W., J. 1995. How do stomata read abscísico acid signals?. *Plant Physiology* ,109:803-811.
- Troughton, J., H. 1969. Plant water status and carbon dioxide exchange of cotton leaves. *Aust. J. Biol. Sci.* 22:289-302.
- Tschaplinki, T., J. and Black, T., J. 1995. Effect of root restriction on growth correlations, water relations and senescence of older seedlings. *Physiol. Plant.*, 64:167-176.
- Tuberosa, R.; Salvi, S.; Sanguineti, M., C.; Landi, P.; Maccaferri, M. and Coti, S. 2002. Mapping QTLs regulating morpho-physiological traits and yield, case studies, shortcomings and perspectives in drought-stressed maize. *Ann. Bot.* 89:941-963.
- Tun, D., J. C.; Santamaría, B., F. y Avilés, B., W. I. 2004. Efecto del sombreado sobre el comportamiento de chile (*Capsicum annuum* L.) en suelos pedregosos de Yucatán. Primera convención mundial del chile. pp. 211-217.
- Unger, P., W. and Kaspar, T., C. 1994. Soil compactation and root growth: a review. *Agron. Journal.* 86:759-766.
- van Hooijdonk, B., M.; Dorji, K. and Behboudian, M., H. 2004. Responses of “Pacific RoseTM” apple to partial rootzone drying and deficit irrigation. *Europ. J. Hort. Sci.* 69:104-110.
- van Iersel, M. 1997. Root restriction effects on growth and development of salvia (*Salvia splendens*). *Hort. Science* 32:1186-1190.
- van Woert, N.; Brandley, D. and Anderson, C. 2005. Watering regime and green root substrate design affect sedum plant. *Growth Hort. Science* 40:95.
- Vargas, T., P. 2007. Caracterización física, química y biológica de polvo de coco y tezontle como sustratos. Tesis de Maestría. Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados, México. 91 p.

- Vavrina, C., S.; Olsen, S. and Cornell, J., A. 1993. Watermelon transplant age: Influence on fruit yield. Hort. Science 28:789-790.
- Verdonck, O.; Penninck, R. and De Boodt, M. 1984. The physical properties of different horticultural substrates. Acta Horticulturae, 150:155-160.
- Wallach, R.; da Silva, F., F. and Chen, Y. 1992. Hydraulic Characteristics of tuff (scoria) used as a container medium. Journal of America Society Horticultural Science, 117:415-421.
- Wang, H., X.; Liu, C., M. and Zhang, L. 2002. Water-saving agriculture in China: an overview. Advances in Agronomy 75:135-171.
- Weston, L., A. 1988. Effect of flat cell size, transplant age, and production site on growth and yield of pepper transplants, Hort. Science 23:709-711.
- Weston, L., A. and Zandstra, B., H. 1986, Effect of root container size and location of production on growth and yield of tomato transplants. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 111:498-501.
- Wien, H., C. 1994. Fruit set in peppers and response to cold temperatures. Department of Horticulture. Cornell University, Ithaca NY. *In*: <http://www.ag.ohio-state.edu/~vegnet/library/res03/pepset.ppt>.
- Wilkinson, S. and Davies, W., J. 1997. Xylem sap pH increase: A drought signal received at the apoplastic face of the guard cell that involves the suppression of saturable abscisic acid uptake by the epidermal symplast. Plant Physiol. 113:559-573.
- Wilkinson, S. and Davies, W., J. 2002. ABA-based chemical signaling: the coordination of responses to stress in plants. Plant, Cell and Environment 25:195-210.
- Wilson, J., W. 1972. Control of crop processes. *In*: Crop processes in controlled environments. A. R. Rees (Ed.) Academic Press. New York, EUA, pp. 7-30.

- Xu, G. and Kafkafi, U. 2001. Nutrient supply and container size effects on flowering, fruiting, assimilate allocation, and water relations of sweet pepper. *Acta Hort.* pp. 113-120.
- Yusuf, A., M.; Johansen, C.; Krishnamurthy, L. and Hamid, A. 2005. Genotypic variation in root systems of chickpea (*Cicer arietinum* L.) across environments. *J. Agron. Crop Sci.* 191(6):464-472.
- Zapata, F. 1990. Técnicas isotópicas en estudio sobre fertilidad del suelo y nutrición de las plantas. *En: Hardarson G. (ed.), Empleo de técnicas nucleares en los estudios de la relación suelo planta.* Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena, Austria, pp. 61-128.
- Zegbe, J., A.; Behboudian, M., H. and Clothier, B., E. 2006. Responses of 'Petopride' processing tomato to partial rootzone drying at different phenological stages. *Irrigation Universidad de Massey, Palmerston North. Nueva Zelandia. Science,* 24:203-210.
- Zegbe-Domínguez, A., J.; Behboudian, M., H.; Lang, A. and Clothier, B., E. 2003. Deficit irrigation and partial rootzone drying maintain fruit dry mass and enhance fruit quality in Petopride processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Scientia Horticulturae (U.K.),* 98:505-510.
- Zegbe, A., J.; Behboudian, M., H.; Lang, A. y Clothier, B., E. 2007. Respuesta del manzano "Pacific Rose™" al riego parcial de la raíz. *Revista Chapingo Serie Horticultura,* 13(1):43-48.
- Zegbe, A., J. and Serna, P., A. 2009. El riego parcial de la raíz incrementa la productividad del agua en manzano en un ambiente semi-árido. *Revista Chapingo Serie Horticultura,* 15(2):111-118.
- Zhang, J. and Davies, W., J. 1989. Abscisic acid produced in dehydrating roots may enable the plant to measure the water status of the soil. *Plant, Cell and Environment (EUA),* 12:73-81.

- Zhang, J. and Davies, W., J. 1990. Changes in the concentration of ABA in xylem sap as function of changing soil water status will account for changes in leaf conductance. *Plant Cell Environ.* 13:277-285.
- Zhang, J.; Schurr, U. and Davies, W., J. 1989. Control of stomatal behavior by abscisic acid which apparently originates in the roots. *J. Exp. Bot* 38:1174-1181.
- Zhang, S., Q. and Outlaw, W., H. 2001. Abscisic acid introduced into the transpiration stream accumulates in the guard-cell apoplast and causes stomatal closure. *Plant Cell Environ.* 24:1045-1054.
- Zhang, J. and Tardieu, F. 1996. Relative contribution of apices and mature tissues to ABA synthesis in droughted maize root system. *Plant Cell Physiol.* 37:598-605.

IX. APÉNDICE

Cuadro 1-A. Factores ambientales obtenidos dentro del invernadero, a partir del 28 de mayo al 13 de julio de 2010

Fecha / Hora	Temperatura (°C)	HR (%)	DPV (mb)	Temperatura (°C)	HR (%)	DPV (mb)	Temperatura (°C)	HR (%)	DPV (mb)
	28/05/2010 (0 ddit)			29/05/2010 (1 ddit)			30/05/2010 (2 ddit)		
00:00	14.5	82.5	2.89	16.5	79.2	3.91	14.4	62.1	6.22
01:00	15.4	81.9	3.16	16.0	77.4	4.11	12.7	69.3	4.51
02:00	15.0	82.2	3.04	16.6	70.9	5.49	12.3	65.1	5.00
03:00	13.7	84.3	2.46	16.4	71.9	5.23	11.7	61.5	5.30
04:00	13.0	84.7	2.29	14.4	78.6	3.52	11.3	65.1	4.67
05:00	12.3	84.3	2.25	12.9	85.2	2.20	11.2	60.9	5.19
06:00	11.7	84.8	2.08	13.4	86.8	2.02	8.6	70.4	3.31
07:00	11.5	86.5	1.83	12.2	86.7	1.89	7.4	81.2	1.94
08:00	13.9	84.6	2.44	13.7	86.4	2.14	10.4	79.1	2.63
09:00	21.6	65.9	8.80	22.2	67.8	8.62	20.7	58.6	10.11
10:00	29.8	45.7	22.79	30.7	44.0	24.75	31.8	33.5	31.25
11:00	36.4	34.7	39.69	37.8	32.6	44.17	37.6	22.9	49.99
12:00	40.2	28.6	53.28	40.9	22.3	60.15	43.2	17.7	71.83
13:00	42.4	24.8	62.97	41.5	20.0	63.92	43.3	14.6	74.99
14:00	34.7	29.2	39.14	46.3	16.5	85.59	46.7	12.7	91.23
15:00	30.5	30.6	30.30	47.9	14.4	95.11	48.1	11.4	99.39
16:00	25.6	38.2	20.28	44.5	13.1	81.16	46.4	12.3	90.27
17:00	34.7	26.7	40.56	35.6	19.8	46.60	41.9	10.2	73.24
18:00	26.5	33.6	22.98	30.4	26.1	32.07	33.1	14.0	43.49
19:00	22.9	40.9	16.50	25.5	34.5	21.36	28.2	19.5	30.79
20:00	19.5	54.4	10.33	23.9	36.4	18.87	23.4	25.3	21.45
21:00	17.9	64.2	7.35	20.0	49.0	11.91	19.0	34.5	14.39
22:00	16.7	72.2	5.29	17.8	58.6	8.43	16.8	43.1	10.88
23:00	16.6	76.9	4.37	16.5	56.5	8.17	15.7	48.9	9.11
	31/05/2010 (3 ddit)			01/06/2010 (4 ddit)			02/06/2010 (5 ddit)		
00:00	14.5	56.6	7.16	14.8	51.9	8.09	14.6	63.7	6.03
01:00	13.3	59.2	6.23	13.7	58.4	6.52	13.7	69.6	4.76
02:00	12.0	67.9	4.50	12.1	63.8	5.11	12.6	73.9	3.80
03:00	10.8	76.5	3.04	12.1	72.6	3.86	11.4	78.5	2.90
04:00	9.6	80.5	2.33	11.5	80.5	2.65	10.9	82.1	2.34
05:00	9.1	83.0	1.97	10.7	82.5	2.25	10.7	82.1	2.30
06:00	8.5	82.3	1.96	9.9	81.6	2.24	11.1	84.2	2.09
07:00	8.4	83.0	1.88	9.7	83.2	2.02	10.6	83.4	2.12
08:00	12.1	80.1	2.81	12.8	75.5	3.63	14.5	78.7	3.51
09:00	22.7	64.4	9.81	21.5	64.3	9.14	23.1	53.5	13.14
10:00	30.5	34.5	28.58	29.3	36.5	25.87	30.4	35.7	27.93
11:00	37.1	27.0	46.04	37.3	25.8	47.36	38.2	26.7	49.08
12:00	42.7	18.1	69.71	40.4	21.0	59.53	40.9	18.9	62.76
13:00	43.3	17.5	72.44	42.3	16.7	69.39	42.8	16.0	71.86
14:00	46.0	14.0	86.81	44.9	14.1	81.90	45.5	13.4	85.16
15:00	48.4	12.3	99.88	44.6	13.2	81.48	48.7	11.1	102.86
16:00	45.8	12.1	87.82	42.0	13.4	71.04	40.9	12.8	67.47
17:00	40.2	11.9	65.68	37.7	15.8	54.88	34.9	14.8	47.64
18:00	32.2	15.5	40.63	31.9	14.7	40.31	32.2	17.5	39.69
19:00	27.3	20.8	28.72	27.8	23.7	28.49	26.0	20.2	26.83
20:00	22.2	26.1	19.77	21.7	29.4	18.33	23.2	24.5	21.48
21:00	19.8	33.1	15.45	18.4	36.3	13.47	20.8	31.0	16.94
22:00	17.9	43.3	11.63	16.7	44.4	10.56	18.0	41.8	12.00
23:00	16.0	52.2	8.68	16.3	54.9	8.36	17.2	41.4	11.50

HR= Humedad relativa DPV= Déficit de presión de vapor (milibars)

Continuación del Cuadro 1-A

Fecha / Hora	Temperatura (°C)	HR (%)	DPV (mb)	Temperatura (°C)	HR (%)	DPV (mb)	Temperatura (°C)	HR (%)	DPV (mb)
	03/06/2010 (6 ddit)			04/06/2010 (7 ddit)			05/06/2010 (8 ddit)		
00:00	16.3	43.6	10.44	14.8	45.4	9.19	17.6	42.4	11.58
01:00	15.4	42.3	10.08	12.7	63.6	5.34	16.5	47.1	9.92
02:00	14.1	48.2	8.34	10.7	68.5	4.06	15.3	53.7	8.04
03:00	13.4	50.6	7.59	9.7	74.4	3.08	13.5	61.9	5.90
04:00	11.7	57.1	5.89	10.0	71.8	3.46	13.6	60.0	6.23
05:00	11.3	66.2	4.52	8.8	76.4	2.67	12.8	64.4	5.26
06:00	9.9	72.0	3.41	8.0	81.9	1.94	11.2	69.2	4.09
07:00	9.1	78.4	2.50	7.4	84.3	1.61	10.4	75.1	3.13
08:00	12.3	77.2	3.26	10.8	80.9	2.47	12.8	75.8	3.58
09:00	21.3	66.6	8.45	20.2	60.2	9.43	21.8	54.0	12.01
10:00	30.6	31.3	30.19	30.3	36.0	27.61	31.0	33.4	29.94
11:00	37.6	22.4	50.33	38.0	25.7	49.23	37.3	25.0	47.86
12:00	41.1	18.8	63.54	40.2	17.8	61.31	41.4	20.8	62.95
13:00	43.0	17.2	71.60	42.6	14.9	72.06	42.0	15.7	69.17
14:00	44.2	13.0	79.99	46.5	11.9	91.15	45.3	12.5	85.15
15:00	36.4	16.4	50.76	47.3	10.7	96.27	46.4	11.6	91.02
16:00	32.2	18.1	39.38	45.2	10.1	87.05	42.9	12.3	75.36
17:00	30.7	19.1	35.73	39.4	16.8	59.44	43.9	12.0	79.71
18:00	29.4	18.9	33.26	35.7	14.0	50.29	31.5	18.6	37.64
19:00	24.7	21.9	24.31	26.7	19.1	28.34	26.2	25.8	25.25
20:00	20.3	33.2	15.91	22.1	25.5	19.80	20.8	39.2	14.93
21:00	18.1	39.8	12.50	20.2	34.0	15.63	17.8	44.6	11.29
22:00	16.7	48.5	9.79	21.0	36.6	15.77	17.5	54.1	9.17
23:00	16.7	51.8	9.16	19.0	45.3	12.01	15.5	67.0	5.80
	06/06/2010 (9 ddit)			07/06/2010 (10 ddit)			08/06/2010 (11 ddit)		
00:00	13.7	75.6	3.83	15.5	58.7	7.27	17.3	50.7	9.72
01:00	12.3	78.8	3.03	16.2	59.8	7.39	16.2	56.9	7.93
02:00	11.7	80.5	2.68	15.4	62.6	6.54	16.0	57.7	7.69
03:00	11.2	81.5	2.46	15.2	64.3	6.16	16.6	54.8	8.54
04:00	10.7	81.4	2.39	14.6	69.7	5.03	16.3	56.9	7.98
05:00	9.9	79.7	2.47	13.5	75.1	3.84	16.1	59.1	7.47
06:00	9.9	81.3	2.27	11.6	81.1	2.58	15.2	66.6	5.77
07:00	10.5	83.8	2.06	11.4	83.0	2.28	14.8	68.7	5.26
08:00	13.4	78.0	3.38	14.5	78.4	3.57	16.1	71.8	5.16
09:00	23.9	61.9	11.31	22.3	54.4	12.27	25.4	49.5	16.38
10:00	31.9	36.7	29.92	21.8	46.1	14.08	33.2	37.4	31.85
11:00	37.8	25.5	48.83	35.2	29.3	40.22	39.5	26.9	52.51
12:00	42.1	23.7	62.94	36.7	26.2	45.58	44.0	20.8	72.12
13:00	43.1	16.1	72.92	40.2	20.6	59.24	41.2	20.0	62.24
14:00	45.2	13.9	83.37	42.7	19.9	68.19	45.1	18.4	78.66
15:00	46.5	11.8	91.31	42.1	17.8	67.76	41.4	17.6	65.46
16:00	46.3	11.0	91.14	44.8	15.8	79.86	33.3	22.9	39.43
17:00	34.2	15.9	45.22	43.0	16.3	72.34	30.0	30.4	29.53
18:00	30.4	19.5	34.94	32.9	20.4	39.84	25.2	34.3	21.04
19:00	26.3	25.9	25.36	27.9	28.9	26.71	20.9	40.5	14.69
20:00	23.3	35.4	18.49	22.7	37.8	17.17	18.6	60.1	8.54
21:00	21.4	38.5	15.66	20.1	44.5	13.06	17.5	67.8	6.44
22:00	17.8	55.1	9.15	20.2	45.9	12.80	16.5	72.1	5.24
23:00	15.9	62.0	6.87	18.3	52.0	10.10	15.3	77.1	3.98

HR= Humedad relativa DPV= Déficit de presión de vapor (milibars)

Continuación del Cuadro 1-A

Fecha / Hora	Temperatura (°C)	HR (%)	DPV (mb)	Temperatura (°C)	HR (%)	DPV (mb)	Temperatura (°C)	HR (%)	DPV (mb)
	09/06/2010 (12 ddit)			10/06/2010 (13 ddit)			11/06/2010 (14 ddit)		
00:00	15.2	78.8	3.66	15.9	80.0	3.61	15.5	76.5	4.14
01:00	14.9	78.3	3.68	15.8	78.8	3.80	15.0	79.8	3.45
02:00	14.0	80.4	3.12	14.2	80.9	3.09	14.2	81.6	2.98
03:00	13.1	80.8	2.90	13.5	84.4	2.41	13.6	84.4	2.43
04:00	12.3	82.6	2.49	13.7	85.6	2.25	14.2	84.1	2.58
05:00	11.4	81.2	3.08	13.5	83.7	2.52	14.6	82.1	2.98
06:00	10.7	83.5	2.13	12.7	84.6	2.26	14.6	84.2	2.63
07:00	10.3	84.1	1.99	12.4	85.4	2.10	13.8	86.8	2.09
08:00	13.5	82.3	2.75	15.0	83.7	2.78	17.0	82.6	3.36
09:00	22.5	62.8	10.13	22.5	69.7	8.26	24.6	63.5	11.30
10:00	31.8	44.2	26.23	32.1	46.0	25.80	31.9	43.5	26.72
11:00	37.5	33.3	43.01	38.4	32.6	45.62	37.5	34.1	42.47
12:00	41.9	26.4	60.02	40.3	28.0	54.00	39.5	27.9	51.79
13:00	38.6	26.1	50.56	38.7	24.5	51.96	40.4	26.4	55.47
14:00	40.7	23.0	58.94	37.7	26.4	48.01	32.8	30.1	34.77
15:00	43.6	18.6	72.59	41.4	20.4	63.26	34.1	28.1	38.47
16:00	41.1	17.7	64.39	30.3	32.3	29.24	41.8	18.2	66.40
17:00	36.5	20.2	48.74	30.7	30.0	30.93	36.7	22.9	47.59
18:00	32.2	26.8	35.18	26.0	41.0	19.81	23.1	49.2	14.36
19:00	22.8	41.9	16.13	23.1	48.7	14.50	22.3	54.8	12.16
20:00	19.4	51.7	10.88	21.6	54.8	11.66	20.1	52.6	11.14
21:00	17.6	67.5	6.53	19.4	57.0	9.67	17.7	59.0	8.30
22:00	16.3	76.3	4.39	17.8	66.6	6.80	17.8	66.7	6.78
23:00	16.4	79.7	3.78	16.7	71.2	5.48	17.0	71.9	5.44
	12/06/2010 (15 ddit)			13/06/2010 (16 ddit)			14/06/2010 (17 ddit)		
00:00	16.2	75.1	4.58	16.8	76.4	4.52	13.7	82.0	2.82
01:00	16.2	70.8	5.38	16.5	78.7	3.99	14.0	82.7	2.76
02:00	16.2	72.1	5.13	16.5	79.1	3.91	13.9	82.4	2.79
03:00	16.0	73.0	4.90	16.0	78.8	3.85	13.5	83.8	2.50
04:00	14.5	78.5	3.55	15.4	81.0	3.33	13.1	84.5	2.33
05:00	14.3	82.4	2.86	14.2	82.3	2.86	12.7	83.8	2.38
06:00	14.7	80.4	3.27	13.3	84.8	2.32	11.8	85.2	2.05
07:00	13.2	84.7	2.31	12.8	85.9	2.08	11.0	85.2	1.94
08:00	16.4	78.9	3.93	15.2	81.2	3.25	13.8	84.2	2.50
09:00	21.7	62.9	9.63	22.8	66.8	9.24	20.5	67.4	7.85
10:00	29.5	46.5	22.04	31.4	44.7	25.41	31.6	43.7	26.16
11:00	35.6	37.6	36.25	37.5	33.7	42.73	37.7	33.1	43.64
12:00	38.7	31.8	46.95	41.2	28.9	55.95	40.9	27.3	56.27
13:00	39.1	31.4	48.22	40.2	29.0	52.94	39.7	26.2	53.56
14:00	35.4	28.9	40.86	41.6	23.7	61.28	38.9	25.1	52.12
15:00	45.3	21.2	76.74	44.2	19.0	74.50	44.8	16.6	79.15
16:00	34.4	28.4	38.94	30.5	30.9	30.89	44.6	14.9	79.93
17:00	28.7	36.6	24.98	32.2	28.4	34.44	33.9	21.3	41.63
18:00	23.4	43.4	16.28	22.8	48.4	14.33	24.1	36.0	19.22
19:00	20.3	59.9	9.55	21.0	52.9	11.71	19.8	49.3	11.70
20:00	18.4	63.9	7.63	18.4	61.7	8.11	18.5	64.6	7.54
21:00	16.4	70.0	5.60	15.7	70.6	5.24	17.9	71.4	5.86
22:00	15.8	73.3	4.79	14.3	79.1	3.41	16.4	75.3	4.61
23:00	17.4	66.3	6.70	13.8	82.2	2.80	15.7	79.1	3.73

HR= Humedad relativa DPV= Déficit de presión de vapor (milibars)

Continuación del Cuadro 1-A

Fecha / Hora	Temperatura (°C)	HR (%)	DPV (mb)	Temperatura (°C)	HR (%)	DPV (mb)	Temperatura (°C)	HR (%)	DPV (mb)
	15/06/2010 (18 ddit)			16/06/2010 (19 ddit)			17/06/2010 (20 ddit)		
00:00	14.4	81.7	3.00	16.2	78.5	3.95	15.2	84.4	2.69
01:00	13.4	80.9	2.93	15.7	82.2	3.17	13.8	86.1	2.19
02:00	12.6	81.5	2.70	15.4	82.8	3.01	14.0	87.0	2.07
03:00	12.1	83.4	2.34	14.9	85.0	2.55	14.3	85.9	2.30
04:00	11.9	84.0	2.22	13.4	87.7	1.88	14.5	86.8	2.18
05:00	12.9	84.5	2.31	14.9	87.1	2.19	13.2	87.1	1.95
06:00	13.0	84.0	2.39	14.4	83.6	2.69	12.4	87.1	1.85
07:00	13.4	84.5	2.38	14.4	86.7	2.18	11.6	87.8	1.67
08:00	15.0	81.8	3.11	15.2	84.7	2.65	13.7	85.5	2.27
09:00	18.0	70.3	6.13	20.4	73.7	6.31	17.9	76.0	4.92
10:00	23.2	56.8	12.27	24.3	60.9	11.87	23.3	60.7	11.25
11:00	29.3	44.2	22.73	30.0	47.6	22.25	24.8	55.7	13.87
12:00	37.1	31.2	43.39	31.2	43.7	25.56	24.2	58.1	12.65
13:00	38.0	29.7	46.60	32.8	38.3	30.71	27.6	45.3	20.18
14:00	41.1	25.2	58.47	27.2	44.0	20.20	30.5	38.9	26.69
15:00	44.2	18.9	74.64	31.8	37.7	29.31	34.4	34.9	36.39
16:00	29.2	32.5	27.34	36.3	28.9	42.94	36.2	31.2	41.33
17:00	23.4	44.6	15.94	28.2	38.6	23.49	24.7	47.3	16.40
18:00	29.3	35.4	26.35	25.8	46.3	17.82	24.3	51.5	14.72
19:00	19.7	57.3	9.79	21.5	52.5	12.19	22.0	53.0	12.43
20:00	17.8	66.2	6.89	18.2	69.8	6.32	19.9	58.8	9.58
21:00	17.4	72.6	5.44	16.3	75.8	4.48	18.2	64.8	7.34
22:00	16.6	77.8	4.18	14.6	82.6	2.90	17.3	68.2	6.27
23:00	16.9	77.9	4.25	15.4	81.8	3.17	16.9	69.7	5.83
	18/06/2010 (21 ddit)			19/06/2010 (22 ddit)			20/06/2010 (23 ddit)		
00:00	16.3	72.9	5.02	15.7	80.6	3.45	13.2	85.9	2.14
01:00	16.1	74.7	4.64	14.8	83.2	2.83	12.8	86.1	2.06
02:00	15.8	77.5	4.04	13.3	85.7	2.18	12.5	86.1	2.01
03:00	15.6	79.6	3.62	12.6	87.8	1.78	12.6	86.2	2.01
04:00	15.5	78.3	3.82	12.3	88.2	1.69	13.1	86.1	2.10
05:00	15.4	79.5	3.59	13.0	87.7	1.84	13.2	86.4	2.06
06:00	14.9	81.9	3.07	13.0	86.1	2.09	12.8	86.3	2.03
07:00	14.9	81.2	3.18	12.8	87.2	1.89	12.0	86.9	1.84
08:00	15.0	81.7	3.11	15.4	80.3	3.45	13.9	84.8	2.41
09:00	16.5	80.2	3.71	21.5	67.8	8.25	19.7	70.5	6.76
10:00	17.7	75.4	4.97	29.5	47.5	21.63	28.5	52.3	18.56
11:00	21.6	62.5	9.68	34.5	34.9	35.58	31.2	41.6	26.55
12:00	32.5	42.4	28.18	40.3	26.9	54.78	37.9	30.3	45.97
13:00	27.2	46.6	19.28	37.6	26.4	47.71	37.0	28.9	44.63
14:00	31.0	44.7	24.86	40.2	21.1	58.84	39.7	24.6	54.75
15:00	40.8	26.7	56.46	44.0	15.9	76.59	43.7	17.2	74.22
16:00	33.2	33.1	34.04	39.9	19.2	59.27	35.6	22.3	45.20
17:00	31.7	34.5	30.63	41.2	15.5	66.44	28.6	34.2	25.74
18:00	24.2	47.0	16.00	22.8	39.6	16.77	27.7	33.6	24.65
19:00	21.3	54.6	11.49	17.0	81.7	3.54	24.9	36.5	20.00
20:00	17.9	65.7	7.04	17.3	85.2	2.92	19.8	45.5	12.57
21:00	16.2	76.3	4.36	16.8	69.1	5.91	18.4	54.4	9.64
22:00	15.6	80.4	3.47	15.7	77.9	3.94	16.6	63.7	6.85
23:00	15.1	81.2	3.23	14.0	83.5	2.64	16.0	69.0	5.63

HR= Humedad relativa DPV= Déficit de presión de vapor (milibars)

Continuación del Cuadro 1-A

Fecha / Hora	Temperatura (°C)	HR (%)	DPV (mb)	Temperatura (°C)	HR (%)	DPV (mb)	Temperatura (°C)	HR (%)	DPV (mb)
	21/06/2010 (24 ddit)			22/06/2010 (25 ddit)			23/06/2010 (26 ddit)		
00:00	16.4	68.7	5.84	15.5	77.1	4.02	14.1	82.3	2.85
01:00	16.1	70.1	5.46	14.6	81.8	3.02	14.7	81.9	3.03
02:00	15.3	74.9	4.36	16.1	77.8	4.07	12.9	86.0	2.08
03:00	14.8	78.3	3.65	15.7	78.5	3.83	12.3	87.3	1.81
04:00	14.8	78.7	3.59	14.3	84.0	2.61	12.0	87.1	1.81
05:00	14.4	80.4	3.21	14.4	83.1	2.77	11.4	87.3	1.71
06:00	13.0	82.7	2.58	13.8	84.8	2.39	11.3	87.6	1.66
07:00	11.9	85.8	1.98	13.3	87.4	1.92	11.5	88.2	1.60
08:00	14.3	84.2	2.57	16.0	83.5	3.00	13.6	87.1	2.00
09:00	21.0	65.5	8.58	22.4	70.6	7.96	21.7	71.2	7.46
10:00	29.0	47.3	21.11	22.5	61.3	10.55	29.0	50.1	20.00
11:00	35.9	36.0	37.80	31.4	44.0	25.72	35.9	38.0	36.63
12:00	40.7	26.7	56.17	37.8	30.4	45.65	39.6	29.7	50.75
13:00	40.2	23.4	57.14	38.5	28.3	48.83	37.4	28.4	45.90
14:00	36.6	25.4	45.82	40.3	23.8	57.15	39.8	26.0	54.03
15:00	45.7	17.2	82.26	45.8	18.1	81.81	43.9	19.9	72.52
16:00	34.7	26.4	40.68	31.7	26.9	34.18	40.9	18.3	63.24
17:00	38.2	24.2	50.81	23.2	47.3	14.98	35.9	21.4	46.47
18:00	26.9	36.9	22.37	19.5	67.4	7.38	21.8	50.1	13.02
19:00	22.4	47.0	14.36	18.8	65.2	7.56	19.5	59.2	9.25
20:00	20.5	54.1	11.07	18.5	70.5	6.28	19.7	57.5	9.75
21:00	19.9	57.7	9.82	17.2	76.7	4.56	18.5	62.0	8.10
22:00	19.2	62.8	8.26	16.2	78.0	4.04	17.3	63.0	7.30
23:00	17.2	68.4	6.20	14.6	82.4	2.93	16.5	71.0	5.45
	24/06/2010 (27 ddit)			25/06/2010 (28 ddit)			26/06/2010 (29 ddit)		
00:00	15.6	75.3	4.38	15.3	80.5	3.38	15.4	77.3	3.97
01:00	15.3	78.9	3.66	14.4	83.3	2.75	15.6	75.3	4.37
02:00	14.2	82.1	2.90	14.2	84.4	2.53	16.1	75.8	4.43
03:00	13.8	84.9	2.37	13.6	85.0	2.33	16.0	76.8	4.22
04:00	14.2	83.6	2.65	12.8	85.4	2.15	15.8	77.9	3.96
05:00	14.2	84.8	2.45	12.4	86.7	1.92	15.5	80.6	3.42
06:00	14.7	82.8	2.87	12.2	87.3	1.81	15.1	80.6	3.33
07:00	12.5	85.7	2.07	11.8	87.8	1.68	14.4	84.4	2.56
08:00	14.6	84.0	2.66	14.7	86.5	2.26	15.9	81.1	3.42
09:00	18.3	74.4	5.39	20.7	71.7	6.91	20.0	70.1	6.99
10:00	26.8	55.7	15.60	28.4	50.0	19.33	29.1	49.9	20.19
11:00	31.7	43.1	26.60	36.1	37.0	37.66	35.7	37.4	36.57
12:00	36.1	32.3	40.48	39.0	31.8	47.72	40.8	27.6	55.77
13:00	31.6	35.9	29.81	36.8	29.7	43.63	38.2	27.4	48.66
14:00	29.3	32.2	27.64	39.6	25.0	54.14	41.0	21.3	61.23
15:00	34.1	29.2	37.88	44.7	20.8	74.74	45.8	17.2	82.67
16:00	32.7	30.1	34.60	40.7	22.0	59.76	38.2	20.6	53.19
17:00	33.2	29.7	35.77	34.5	25.0	41.01	40.7	20.4	60.93
18:00	24.5	42.8	17.59	27.3	34.5	23.75	33.2	25.7	37.78
19:00	21.7	52.9	12.22	24.5	45.3	16.82	25.1	34.5	20.88
20:00	19.4	63.0	8.33	22.5	52.2	13.01	21.7	54.5	11.81
21:00	17.7	72.7	5.53	19.8	59.6	9.32	19.5	55.6	10.07
22:00	16.3	75.8	4.49	18.2	65.6	7.18	18.1	59.5	8.41
23:00	15.9	78.3	3.92	16.6	72.6	5.17	18.0	60.3	8.19

HR= Humedad relativa DPV= Déficit de presión de vapor (milibars)

Continuación del Cuadro 1-A

Fecha / Hora	Temperatura (°C)	HR (%)	DPV (mb)	Temperatura (°C)	HR (%)	DPV (mb)	Temperatura (°C)	HR (%)	DPV (mb)
	27/06/2010 (30 ddit)			28/06/2010 (31 ddit)			29/06/2010 (32 ddit)		
00:00	15.5	68.7	5.52	14.9	72.7	4.62	15.5	72.7	4.81
01:00	14.2	76.6	3.79	13.5	78.3	3.35	14.4	77.1	3.75
02:00	13.3	81.7	2.80	12.7	81.7	2.69	13.3	81.8	2.77
03:00	12.7	82.8	2.53	12.2	84.9	2.14	14.5	80.9	3.16
04:00	12.8	83.8	2.40	12.1	86.0	1.97	13.8	83.2	2.66
05:00	12.4	84.8	2.18	12.1	86.0	1.98	12.8	85.1	2.19
06:00	11.7	85.4	2.00	12.0	86.0	1.96	12.3	85.6	2.05
07:00	11.3	86.3	1.83	11.7	86.3	1.88	12.5	86.3	1.98
08:00	14.3	84.3	2.55	13.8	84.4	2.46	15.5	82.2	3.13
09:00	21.9	66.7	8.74	19.1	71.7	6.25	21.8	65.6	8.98
10:00	30.6	46.2	23.62	31.7	41.3	27.42	23.3	53.4	13.32
11:00	35.4	36.4	36.56	37.9	31.2	45.32	31.0	42.3	25.92
12:00	40.5	30.4	52.74	39.7	25.5	54.13	36.8	30.6	43.10
13:00	39.4	25.5	53.23	32.6	29.6	34.64	37.8	29.5	46.23
14:00	39.7	27.5	52.61	38.3	24.4	50.93	36.9	27.2	45.47
15:00	44.1	21.0	72.27	46.2	19.3	82.28	40.2	22.2	58.01
16:00	41.3	21.7	61.90	44.7	17.8	77.60	37.3	24.9	47.90
17:00	35.9	24.4	44.65	39.8	17.5	60.20	39.9	21.0	57.95
18:00	28.9	30.9	27.53	34.7	23.9	42.10	29.5	31.0	28.46
19:00	25.9	40.9	19.76	26.6	38.8	21.31	26.8	35.2	22.83
20:00	22.5	45.5	14.84	23.5	43.6	16.34	22.2	47.3	14.11
21:00	18.5	57.4	9.07	19.2	54.5	10.12	18.8	57.1	9.31
22:00	16.7	69.6	5.78	17.5	62.2	7.56	17.0	63.4	7.09
23:00	16.3	69.4	5.67	16.9	66.7	6.41	15.4	68.6	5.50
	30/06/2010 (33 ddit)			01/07/2010 (34 ddit)			02/07/2010 (35 ddit)		
00:00	15.4	71.8	4.93	17.4	71.9	5.58	17.8	70.6	5.98
01:00	14.4	77.7	3.66	17.4	71.4	5.69	17.7	71.2	5.83
02:00	13.9	81.7	2.90	17.2	73.8	5.14	17.1	74.8	4.91
03:00	14.4	84.0	2.62	17.0	75.6	4.73	16.5	77.6	4.20
04:00	15.5	80.8	3.37	16.6	76.9	4.37	16.2	78.1	4.03
05:00	15.6	81.6	3.27	16.5	75.6	4.58	16.1	78.2	3.98
06:00	15.6	82.7	3.06	16.0	77.9	4.02	15.8	79.3	3.71
07:00	14.1	86.3	2.21	15.9	78.5	3.87	15.8	80.5	3.41
08:00	15.2	84.5	2.68	16.9	76.2	4.58	16.5	81.3	3.51
09:00	19.0	75.4	5.40	19.6	69.7	6.90	21.2	66.3	8.47
10:00	24.0	56.1	13.10	20.1	67.2	7.71	27.1	51.2	17.50
11:00	30.9	36.3	28.45	24.7	55.9	13.73	31.2	42.5	26.13
12:00	38.8	29.8	48.60	26.7	49.8	17.58	33.7	38.1	32.37
13:00	36.5	29.3	43.19	31.5	39.2	28.09	31.4	39.2	27.95
14:00	35.0	27.9	40.52	28.9	41.9	23.12	32.2	35.4	31.06
15:00	29.7	36.6	26.42	30.5	38.4	26.90	37.1	32.2	42.79
16:00	28.9	36.9	25.12	34.9	32.8	37.56	37.9	28.6	47.06
17:00	26.7	41.2	20.59	33.4	31.7	35.15	28.2	42.1	22.14
18:00	24.5	44.9	16.93	28.3	40.1	23.04	22.5	55.9	12.02
19:00	22.3	52.2	12.87	22.8	52.7	13.12	20.6	62.9	8.99
20:00	19.8	60.1	9.20	19.5	60.9	8.86	19.6	64.8	8.03
21:00	18.8	64.6	7.68	18.0	66.5	6.91	19.4	66.8	7.48
22:00	18.5	66.1	7.22	18.1	69.6	6.31	18.7	67.7	6.96
23:00	17.8	69.1	6.30	17.8	70.2	6.07	17.7	70.5	5.97

HR= Humedad relativa DPV= Déficit de presión de vapor (milibars)

Continuación del Cuadro 1-A

Fecha / Hora	Temperatura (°C)	HR (%)	DPV (mb)	Temperatura (°C)	HR (%)	DPV (mb)	Temperatura (°C)	HR (%)	DPV (mb)
	03/07/2010 (36 ddit)			04/07/2010 (37 ddit)			05/07/2010 (38 ddit)		
00:00	18.1	71.3	5.95	14.4	84.7	2.51	16.0	80.2	3.59
01:00	17.7	73.5	5.37	14.2	86.0	2.27	16.0	80.9	3.46
02:00	15.8	79.6	3.66	13.1	84.8	2.29	14.5	78.0	3.63
03:00	15.7	76.6	4.17	12.2	85.6	2.04	14.0	81.1	3.02
04:00	14.1	82.1	2.88	12.7	85.8	2.08	13.9	83.6	2.60
05:00	13.0	86.0	2.10	12.5	86.5	1.96	14.0	84.1	2.54
06:00	12.4	88.0	1.73	11.9	86.3	1.91	13.8	85.8	2.24
07:00	12.1	89.0	1.56	11.0	87.4	1.65	13.7	86.5	2.11
08:00	14.9	82.8	2.92	13.9	84.6	2.44	15.6	84.5	2.74
09:00	19.1	73.4	5.87	22.4	70.2	8.07	21.5	68.9	7.97
10:00	29.4	52.3	19.54	29.5	49.3	20.89	31.1	49.1	23.02
11:00	24.9	53.7	14.58	34.1	39.1	32.58	38.6	35.1	44.39
12:00	36.1	34.8	38.98	38.5	31.5	46.63	41.2	30.7	54.52
13:00	35.0	31.3	38.62	37.8	31.8	44.72	37.9	29.3	46.62
14:00	26.2	43.1	19.37	36.7	28.1	44.37	40.8	26.9	56.26
15:00	24.8	44.8	17.29	35.2	28.8	40.47	41.7	25.1	60.44
16:00	30.0	38.1	26.59	31.0	31.6	30.73	31.2	33.3	30.33
17:00	21.8	51.2	12.74	26.4	37.7	21.42	31.1	32.5	30.48
18:00	20.3	55.5	10.60	22.5	49.6	13.75	23.5	43.0	16.50
19:00	18.3	71.8	5.94	21.1	55.2	11.20	20.8	56.5	10.67
20:00	17.4	75.5	4.87	19.1	65.4	7.65	18.1	60.2	8.26
21:00	16.4	78.9	3.94	17.1	76.2	4.64	17.2	67.5	6.38
22:00	16.3	80.6	3.59	16.5	77.1	4.16	17.0	70.2	5.78
23:00	15.5	83.0	2.99	16.1	77.1	4.19	16.6	77.6	4.22
	06/07/2010 (39 ddit)			07/07/2010 (40 ddit)			08/07/2010 (41 ddit)		
00:00	15.9	77.5	4.06	16.4	84.7	2.85	16.6	82.0	3.40
01:00	15.6	80.6	3.43	16.2	85.2	2.72	16.4	82.4	3.29
02:00	15.3	82.5	3.05	16.2	85.3	2.71	16.2	82.4	3.24
03:00	15.5	82.7	3.04	15.7	86.1	2.49	16.0	83.9	2.92
04:00	14.9	84.3	2.65	15.5	86.6	2.35	16.0	84.6	2.80
05:00	14.0	85.2	2.37	15.2	87.0	2.24	15.6	84.9	2.67
06:00	14.0	85.7	2.29	15.1	87.9	2.08	15.6	85.8	2.51
07:00	14.0	86.2	2.21	15.4	88.2	2.06	15.4	86.7	2.32
08:00	15.2	86.3	2.36	16.1	87.3	2.33	16.0	87.1	2.35
09:00	18.5	80.9	4.07	22.3	75.3	6.65	19.0	80.1	4.38
10:00	22.6	63.5	10.02	23.4	65.4	9.97	23.3	66.0	9.72
11:00	27.8	52.6	17.70	28.9	52.5	18.90	23.7	57.8	12.37
12:00	39.8	32.2	49.45	37.1	39.4	38.26	27.9	48.9	19.20
13:00	38.8	30.7	47.92	38.1	35.4	43.05	34.0	37.8	33.11
14:00	37.2	30.6	44.03	40.1	30.2	51.74	35.0	34.9	36.60
15:00	42.0	27.0	59.84	43.1	25.7	64.53	26.3	51.2	16.69
16:00	29.0	41.1	23.61	31.1	35.9	45.09	27.7	50.9	18.25
17:00	19.2	74.2	5.74	29.9	37.6	26.32	26.8	49.3	17.88
18:00	17.8	70.7	5.97	22.4	49.8	13.60	22.7	58.8	11.37
19:00	17.2	75.7	4.76	18.2	68.5	6.59	20.8	63.2	9.04
20:00	17.1	77.6	4.37	17.5	75.2	4.95	18.6	73.5	5.67
21:00	16.9	80.7	3.71	17.2	77.5	4.41	18.0	78.4	4.45
22:00	16.7	82.8	3.26	17.1	79.0	4.10	17.3	79.1	4.13
23:00	16.5	83.7	3.06	16.9	80.7	3.72	16.2	80.0	3.68

HR= Humedad relativa DPV= Déficit de presión de vapor (milibars)

Continuación del Cuadro 1-A

Fecha / Hora	Temperatura (°C)	HR (%)	DPV (mb)	Temperatura (°C)	HR (%)	DPV (mb)	Temperatura (°C)	HR (%)	DPV (mb)
	09/07/2010 (42 ddit)			10/07/2010 (43 ddit)			11/07/2010 (44 ddit)		
00:00	16.0	82.2	3.24	15.3	85.6	2.50	15.7	85.1	2.66
01:00	15.8	82.9	3.06	14.9	86.6	2.27	15.4	86.7	2.32
02:00	15.8	85.0	2.70	14.5	88.0	1.97	14.9	87.4	2.14
03:00	15.4	83.9	2.81	14.4	88.0	1.97	13.9	88.4	1.84
04:00	15.6	86.1	2.46	14.5	88.8	1.85	13.5	88.7	1.75
05:00	15.4	85.2	2.59	14.6	87.6	2.06	13.6	89.1	1.70
06:00	14.9	85.7	2.42	14.0	88.8	1.79	12.4	88.6	1.64
07:00	14.8	85.4	2.46	14.2	90.0	1.62	11.5	89.7	1.39
08:00	15.5	86.6	2.35	15.4	89.3	1.87	13.9	89.3	1.70
09:00	19.6	76.1	5.44	20.9	79.9	4.98	19.3	78.0	4.92
10:00	24.8	62.2	11.83	28.1	61.5	14.65	26.0	59.8	13.50
11:00	23.7	62.2	10.62	27.6	52.2	17.65	31.9	45.9	25.60
12:00	21.6	63.5	9.42	31.8	44.2	26.24	39.3	34.4	46.61
13:00	22.0	63.4	9.68	33.1	40.1	30.29	38.8	33.5	46.03
14:00	25.3	55.0	14.51	28.7	42.8	22.52	35.5	35.8	37.12
15:00	28.4	49.1	19.68	28.2	44.9	21.06	37.3	31.9	43.46
16:00	25.8	56.8	14.34	22.2	59.6	10.80	30.0	40.5	25.25
17:00	25.1	58.6	13.19	21.0	64.0	8.95	25.5	47.3	17.20
18:00	20.6	64.9	8.51	21.7	65.2	9.03	32.0	36.3	30.28
19:00	18.8	69.9	6.53	20.6	66.2	8.21	23.1	51.0	13.84
20:00	16.8	78.9	4.03	19.2	73.3	5.93	19.2	62.7	8.30
21:00	15.8	81.5	3.32	17.5	79.7	4.05	18.2	69.0	6.47
22:00	15.3	83.4	2.89	16.9	81.9	3.49	16.6	73.4	5.02
23:00	15.3	85.0	2.61	16.5	83.9	3.02	14.5	81.2	3.09
	12/07/2010 (45 ddit)			13/07/2010 (46 ddit)					
00:00	13.5	85.4	2.26	14.9	81.1	3.20			
01:00	13.1	86.1	2.10	14.3	85.2	2.41			
02:00	12.9	86.1	2.07	13.9	84.3	2.49			
03:00	12.4	85.9	2.03	13.4	83.6	2.51			
04:00	11.9	86.3	1.90	12.8	84.6	2.27			
05:00	11.7	87.5	1.72	12.7	86.4	2.00			
06:00	12.5	88.1	1.73	12.7	86.9	1.92			
07:00	12.6	86.9	1.91	11.8	87.1	1.78			
08:00	14.2	85.6	2.33	13.8	86.6	2.11			
09:00	16.9	81.6	3.55	20.6	73.0	6.55			
10:00	24.2	63.4	11.06	25.6	58.4	13.66			
11:00	34.0	41.7	31.02	30.4	49.3	22.00			
12:00	39.8	35.7	46.95	39.2	35.2	45.81			
13:00	34.9	35.9	35.84	33.8	36.3	33.53			
14:00	36.7	32.6	41.73	37.1	26.2	46.54			
15:00	28.8	44.0	22.17	38.2	26.8	49.00			
16:00	41.4	28.5	56.82	32.4	32.7	32.76			
17:00	36.9	30.5	43.38	32.8	31.0	34.32			
18:00	25.1	49.4	16.13	29.8	30.1	29.30			
19:00	26.7	47.4	18.44	29.3	29.8	28.62			
20:00	22.6	54.6	12.46	22.7	39.6	16.66			
21:00	19.5	66.5	7.59	18.3	63.5	7.67			
22:00	18.2	68.9	6.49	16.5	70.7	5.51			
23:00	16.9	73.7	5.06	14.8	79.1	3.51			

HR= Humedad relativa DPV= Déficit de presión de vapor (milibars)

Cuadro 2-A. Volumen evapotranspirado ($L\ pl^{-1}$) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), durante el periodo experimental

Factor		Días después de iniciados los tratamientos "ddit"		
		15	30	45
Sustrato (A)	Tezontle	17.537a [∞]	33.687a	47.162a
	Composta	14.156b	24.779b	33.242b
HAR (B)	SPR80-30	12.847c	23.414c	32.065c
	SPR80-80	22.670a	42.520a	57.330a
	RC50	10.485d	18.488d	25.503d
	RC80	17.383b	32.510b	45.911b

[∞] = Los valores con las mismas literales son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)

Cuadro 3-A. Potencial hídrico de la hoja (Ψ_{hoja} ; MPa) de plantas de pimiento morrón medido en la mañana (7:00 h) y al mediodía (12:00 h) en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), durante el periodo experimental

Factor		Días después de iniciados los tratamientos "ddit"					
		7:00 h			12:00 h		
		15	30	45	15	30	45
Sustrato (A)	Tezontle	-0.41 ± 0.006a [∞]	-0.40 ± 0.047a	-0.47 ± 0.038a	-0.84 ± 0.064a	-1.00 ± 0.083a	-0.88 ± 0.084a
	Composta	-0.50 ± 0.014b	-0.41 ± 0.037a	-0.55 ± 0.034b	-1.22 ± 0.080b	-1.02 ± 0.073a	-1.01 ± 0.049b
HAR (B)	SPR80-30	-0.45 ± 0.001a	-0.39 ± 0.019ab	-0.51 ± 0.019b	-0.97 ± 0.015ab	-1.02 ± 0.022a	-0.97 ± 0.036bc
	SPR80-80	-0.44 ± 0.014a	-0.32 ± 0.022a	-0.46 ± 0.008a	-0.92 ± 0.089a	-0.92 ± 0.018a	-0.86 ± 0.019a
	RC50	-0.47 ± 0.019a	-0.48 ± 0.008c	-0.58 ± 0.008c	-1.15 ± 0.043b	-1.15 ± 0.025b	-1.06 ± 0.054c
	RC80	-0.46 ± 0.019a	-0.42 ± 0.023bc	-0.50 ± 0.001ab	-1.10 ± 0.022ab	-0.95 ± 0.028a	-0.89 ± 0.036ab
F.V.		Valores de Fc					
A		38.89**	0.60 ^{NS}	17.44*	61.67**	0.77 ^{NS}	34.31**
B		0.70 ^{NS}	12.04**	19.23**	4.40*	11.88**	12.30**
A*B		1.26	2.70	6.95**	0.82	7.03**	7.09**
C.V. (%)		8.1	13.1	6.5	14.1	8.2	7.8
Media general		-0.45	-0.40	-0.51	-1.03	-1.01	-0.94

NS= No Significativo * = Significativo ($P \leq 0.05$) ** = Altamente Significativo ($P \leq 0.01$) [∞] = Los valores con las mismas literales son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)

Cuadro 4-A. Intercambio de gases de las plantas de pimienta morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), durante el periodo experimental

Factor	Días después de iniciados los tratamientos "ddit"									
	Conductancia estomática (mmol m ⁻² s ⁻¹)			Transpiración (mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)			Asimilación de CO ₂ (mmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)			
	15	30	45	15	30	45	15	30	45	
Sustrato (A)	Tezontle	265.4a [∞]	1795.0a	1443.8a	5.43a	5.13a	4.54b	17.46b	15.52a	7.40a
	Composta	200.7b	1727.2a	1038.5b	5.08b	5.38a	4.94a	18.99a	14.10b	7.39a
HAR (B)	SPR80-30	226.6a	1643.1b	827.6b	5.11a	5.07b	4.31c	16.96c	13.16b	5.20b
	SPR80-80	236.5a	1760.6ab	863.8b	5.26a	5.55a	4.59bc	17.71bc	14.50ab	5.37b
	RC50	235.2a	1860.2a	1333.5b	5.27a	5.05b	5.17a	19.34a	16.07a	13.18a
	RC80	233.9a	1780.5ab	1939.8a	5.37a	5.36ab	4.89ab	18.89ab	15.50a	5.83b
F.V.		Valores de Fc								
A	158.75**	2.41 ^{NS}	4.48*	35.64**	65.97**	4.19**	38.36**	13.84*	0.00 ^{NS}	
B	0.21 ^{NS}	4.22*	13.26**	1.64 ^{NS}	4.11*	10.03**	13.54**	7.40**	55.25**	
A*B	0.13	51.27**	30.74**	0.45	3.68*	62.15**	10.01**	5.27**	17.39**	
C.V. (%)	11.7	7.0	32.5	4.5	6.4	6.9	4.6	9.0	19.9	
Media general	233.06	1761.12	1241.16	5.26	5.26	4.74	18.22	14.81	7.40	

NS= No Significativo * = Significativo (P ≤ 0.05) ** = Altamente Significativo (P ≤ 0.01) ∞ = Los valores con las mismas literales son estadísticamente iguales (α ≤ 0.05)

Cuadro 5-A. Eficiencia en el uso del agua instantánea de las hojas de plantas de pimienta morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), durante el periodo experimental

Factor	EUAI			
	Días después de iniciados los tratamientos "ddit"			
	15	30	45	
Sustrato (A)	Tezontle	3.217 ± 0.13b	3.028 ± 0.12a	1.668 ± 0.33a
	Composta	3.748 ± 0.12a	2.637 ± 0.26b	1.399 ± 0.49b
HAR (B)	SPR80-30	3.336 ± 0.05b	2.616 ± 0.17b	1.212 ± 0.12b
	SPR80-80	3.393 ± 0.11b	2.636 ± 0.05b	1.222 ± 0.13b
	RC50	3.671 ± 0.03a	3.191 ± 0.09a	2.528 ± 0.06a
	RC80	3.530 ± 0.08ab	2.886 ± 0.16ab	1.171 ± 0.13b
F.V.		Valores de Fc		
A	277.27**	32.40*	7.28*	
B	5.13**	5.91**	44.01**	
A*B	4.76*	2.72	2.71	
C.V. (%)	5.4	11.0	18.4	
Media general	3.48	2.83	1.53	

* = Significativo (P ≤ 0.05) ** = Altamente Significativo (P ≤ 0.01) ∞ = Los valores con las mismas literales son estadísticamente iguales (α ≤ 0.05)

Cuadro 6-A. Área foliar ($\text{m}^2 \text{pl}^{-1}$) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), durante el periodo experimental

Factor		Días después de iniciados los tratamientos "ddit"		
		15	30	45
Sustrato (A)	Tezontle	0.19557 ± 0.008a ∞	0.22003 ± 0.013a	0.235201 ± 0.014a
	Composta	0.19367 ± 0.009a	0.21319 ± 0.015a	0.244845 ± 0.013a
HAR (B)	SPR80-30	0.19527 ± 0.002a	0.24308 ± 0.013a	0.258487 ± 0.009a
	SPR80-80	0.20656 ± 0.032a	0.21854 ± 0.011ab	0.250147 ± 0.011a
	RC50	0.18536 ± 0.019a	0.19404 ± 0.015b	0.215221 ± 0.011b
	RC80	0.19131 ± 0.010a	0.21079 ± 0.005ab	0.236235 ± 0.012ab
F.V.		Valores de Fc		
A		0.11 ^{NS}	0.37 ^{NS}	1.62 ^{NS}
B		0.65 ^{NS}	4.68*	9.69**
A*B		1.91	1.25	3.74*
C.V. (%)		16.1	12.3	7.1
Media general		0.1946	0.2166	0.2400

NS= No Significativo * = Significativo ($P \leq 0.05$) ** = Altamente Significativo ($P \leq 0.01$) ∞ = Los valores con las mismas literales son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)

Cuadro 7-A. Materia fresca y seca de la raíz (g pl^{-1}) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), durante el periodo experimental

Factor		Días después de iniciados los tratamientos "ddit"					
		Materia fresca			Materia seca		
		15	30	45	15	30	45
Sustrato (A)	Tezontle	88.31±9.51a ∞	83.25±9.46a	101.12±4.69a	6.77±0.73a	7.67±0.06a	7.86±0.58a
	Composta	60.19±7.64b	58.69±4.19b	66.06±6.99b	5.76±0.85b	5.09±0.26b	5.82±0.58b
HAR (B)	SPR80-30	72.50±4.65ab	60.50±5.61b	88.00±6.56a	6.31±0.64a	6.47±0.79a	7.27±0.52a
	SPR80-80	90.75±4.10a	80.37±8.48a	84.25±6.86a	6.58±0.49a	6.64±0.21a	6.67±0.66a
	RC50	73.25±7.78ab	68.50±7.02ab	86.37±8.71a	6.59±0.50a	6.02±0.49a	6.77±0.65a
	RC80	60.50±7.99b	74.50±3.63ab	75.75±7.49a	5.58±0.49a	6.40±0.44a	6.66±0.61a
F.V.		Valores de Fc					
A		25.06*	34.39**	44.13**	5.25*	56.94**	27.14*
B		4.35*	3.28*	0.68 ^{NS}	1.18 ^{NS}	0.29 ^{NS}	0.25 ^{NS}
A*B		1.21	3.21*	1.50	7.48**	0.12	2.39
C.V. (%)		22.7	18.7	22.3	19.8	21.5	24.0
Media general		74.25	70.97	83.59	6.26	6.38	6.84

NS= No Significativo * = Significativo ($P \leq 0.05$) ** = Altamente Significativo ($P \leq 0.01$) ∞ = Los valores con las mismas literales son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)

Cuadro 8-A. Materia fresca y seca del tallo (g pl⁻¹) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), durante el periodo experimental

Factor		Días después de iniciados los tratamientos "ddit"					
		Materia fresca			Materia seca		
		15	30	45	15	30	45
Sustrato (A)	Tezontle	59.44±4.91a [∞]	65.75±4.28a	67.69±6.18a	8.68±0.66a	10.79±0.66a	11.83±1.17a
	Composta	59.50±3.03a	68.25±4.95a	73.37±3.89a	8.63±0.44a	10.24±0.67a	12.31±0.50a
HAR (B)	SPR80-30	57.62±2.08a	75.37±6.49a	72.25±3.54a	8.29±0.28a	11.78±0.59a	12.02±0.59a
	SPR80-80	65.75±4.45a	67.37±5.29a	76.00±7.73a	9.44±0.64a	10.29±0.69a	12.46±1.26a
	RC50	56.62±7.43a	58.00±5.63a	62.12±5.04a	8.33±0.99a	9.45±0.99a	11.02±0.96a
	RC80	57.87±2.47a	67.25±2.62a	71.75±4.76a	8.56±0.48a	10.52±0.25a	12.76±0.98a
F.V.		Valores de Fc					
	A	0.00 ^{NS}	1.55 ^{NS}	1.73 ^{NS}	0.02 ^{NS}	0.65 ^{NS}	0.47 ^{NS}
	B	1.09 ^{NS}	2.65 ^{NS}	2.25 ^{NS}	0.93 ^{NS}	2.23 ^{NS}	0.85 ^{NS}
	A*B	1.63	0.35	2.31	1.78	0.59	2.33
	C.V. (%)	19.2	18.4	15.8	18.2	17.3	19.3
	Media general	59.47	67.00	70.53	8.65	10.51	12.07

NS= No Significativo ∞ = Los valores con las mismas literales son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)

Cuadro 9-A. Materia fresca y seca de la hoja (g pl⁻¹) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), durante el periodo experimental

Factor		Días después de iniciados los tratamientos "ddit"					
		Materia fresca			Materia seca		
		15	30	45	15	30	45
Sustrato (A)	Tezontle	96.81 ± 7.79a [∞]	112.75 ± 5.13a	123.05 ± 8.83a	12.34 ± 0.93a	15.59 ± 0.56a	17.61 ± 1.14a
	Composta	93.44 ± 3.01a	108.25 ± 7.31a	127.12 ± 6.46a	12.08 ± 0.36a	14.40 ± 0.92a	17.80 ± 0.75a
HAR (B)	SPR80-30	91.37 ± 3.75a	121.50 ± 9.12a	133.00 ± 5.95a	11.61 ± 0.39a	16.17 ± 1.04a	18.49 ± 0.84a
	SPR80-80	101.37 ± 3.51a	111.12 ± 6.05a	132.25 ± 10.3a	12.86 ± 0.46a	15.06 ± 0.84a	18.26 ± 1.19a
	RC50	92.50 ± 11.52a	99.12 ± 10.13a	112.75 ± 5.65b	12.08 ± 1.45a	13.68 ± 1.21a	16.47 ± 0.95a
	RC80	95.25 ± 5.47a	110.25 ± 3.74a	122.34 ± 7.84ab	12.29 ± 0.66a	15.09 ± 0.38a	17.59 ± 1.11a
F.V.		Valores de Fc					
	A	0.36 ^{NS}	0.31 ^{NS}	0.52 ^{NS}	0.18 ^{NS}	1.38 ^{NS}	0.04 ^{NS}
	B	0.46 ^{NS}	2.00 ^{NS}	4.47*	0.46 ^{NS}	1.77 ^{NS}	1.75 ^{NS}
	A*B	1.68	0.55	3.35*	1.79	0.85	3.53*
	C.V. (%)	19.6	16.5	10.2	17.8	14.5	10.9
	Media general	95.12	110.50	125.08	12.21	15.00	17.70

NS= No Significativo * = Significativo ($P \leq 0.05$) ∞ = Los valores con las mismas literales son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)

Cuadro 10-A. Materia fresca y seca del fruto (g pl⁻¹) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), durante el periodo experimental

Factor		Días después de iniciados los tratamientos "ddit"					
		Materia fresca			Materia seca		
		15	30	45	15	30	45
Sustrato (A)	Tezontle	413.38 ± 16.06a [∞]	823.69 ± 40.05a	1100.88 ± 78.41a	20.23 ± 0.41a	49.31 ± 1.65a	74.86 ± 3.09a
	Composta	433.38 ± 23.98a	760.56 ± 46.15b	1013.19 ± 70.17a	22.22 ± 0.82a	45.99 ± 2.09a	73.76 ± 0.72a
HAR (B)	SPR80-30	445.38 ± 31.86a	835.38 ± 42.28a	1106.00 ± 38.37a	22.54 ± 0.99a	50.84 ± 2.92a	73.36 ± 1.24a
	SPR80-80	445.00 ± 41.85a	845.75 ± 40.95a	1165.38 ± 98.66a	20.37 ± 0.88a	48.65 ± 2.14a	76.61 ± 3.63a
	RC50	398.75 ± 45.53a	693.25 ± 28.75b	885.25 ± 52.20b	20.63 ± 1.13a	43.67 ± 2.23a	71.76 ± 5.08a
	RC80	404.38 ± 16.88a	794.13 ± 37.98ab	1071.50 ± 57.49a	21.37 ± 1.11a	47.44 ± 0.66a	75.50 ± 5.77a
F.V.		Valores de Fc					
A		0.37 ^{NS}	4.56*	5.82 ^{NS}	2.72 ^{NS}	1.58 ^{NS}	0.24 ^{NS}
B		0.88 ^{NS}	5.55**	7.96**	0.91 ^{NS}	2.65 ^{NS}	0.46 ^{NS}
A*B		0.65	0.16	0.08	0.18	0.14	0.86
C.V. (%)		18.0	10.5	11.5	13.5	10.9	12.1
Media general		423.37	792.12	1057.03	21.22	47.65	74.31

NS= No Significativo * = Significativo (P ≤ 0.05) ** = Altamente Significativo (P ≤ 0.01) ∞ = Los valores con las mismas literales son estadísticamente iguales (α ≤ 0.05)

Cuadro 11-A. Materia fresca y seca total (g pl⁻¹) de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), durante el periodo experimental

Factor		Días después de iniciados los tratamientos "ddit"					
		Materia fresca			Materia seca		
		15	30	45	15	30	45
Sustrato (A)	Tezontle	657.9 ± 35.43a [∞]	1085.4 ± 43.6a	1392.7 ± 93.4a	48.03 ± 1.87a	83.36 ± 2.72a	112.16 ± 5.38a
	Composta	646.5 ± 34.75a	995.7 ± 60.8b	1279.7 ± 75.5b	48.69 ± 2.24a	75.72 ± 3.79b	109.69 ± 2.35a
HAR (B)	SPR80-30	666.9 ± 38.69a	1092.7 ± 58.9a	1399.2 ± 51.9a	48.75 ± 2.09a	85.26 ± 4.32a	111.14 ± 2.89a
	SPR80-80	702.9 ± 42.92a	1104.6 ± 58.4a	1457.9 ± 119.4a	49.26 ± 1.90a	80.66 ± 3.55ab	114.01 ± 6.18a
	RC50	621.1 ± 57.18a	918.9 ± 35.1b	1146.5 ± 70.43b	47.63 ± 3.95a	72.81 ± 3.88b	106.03 ± 7.48a
	RC80	618.0 ± 18.65a	1046.1 ± 40.9ab	1341.3 ± 69.37ab	47.78 ± 1.45a	79.45 ± 1.29ab	112.52 ± 5.03a
F.V.		Valores de Fc					
A		0.07 ^{NS}	5.60*	4.62*	0.07 ^{NS}	6.79*	0.35 ^{NS}
B		1.47 ^{NS}	5.03*	6.61**	0.13 ^{NS}	3.07 ^{NS}	0.67 ^{NS}
A*B		1.48	0.18	0.35	2.20	0.30	1.89
C.V. (%)		14.5	10.3	11.1	12.9	10.4	10.8
Media general		652.22	1040.59	1336.24	48.36	79.54	110.92

NS= No Significativo * = Significativo (P ≤ 0.05) ** = Altamente Significativo (P ≤ 0.01) ∞ = Los valores con las mismas literales son estadísticamente iguales (α ≤ 0.05)

Cuadro 12-A. Calidad del fruto de plantas de pimiento morrón en términos de firmeza y sólidos solubles totales (°Brix) en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), a los 45 días después de haber iniciado los tratamientos (ddit)

Factor		Firmeza (N=newton)	Sólidos solubles totales °Brix
Sustrato (A)	Tezontle	9.32 ± 0.24a [∞]	7.47 ± 0.23a
	Composta	7.99 ± 0.31b	6.92 ± 0.09a
HAR (B)	SPR80-30	8.99 ± 0.81a	7.29 ± 0.29a
	SPR80-80	8.89 ± 0.19a	6.87 ± 0.35a
	RC50	8.38 ± 0.33a	7.44 ± 0.29a
	RC80	8.36 ± 0.15a	7.19 ± 0.35a
F.V.		Valores de Fc	
A		8.69**	4.17 ^{NS}
B		0.53 ^{NS}	0.80 ^{NS}
A*B		0.49	0.36
C.V. (%)		14.7	10.5
Media general		8.65	7.20

NS= No Significativo ** = Altamente Significativo ($P \geq 0.01$) [∞] = Los valores con las mismas literales son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)

Cuadro 13-A. Eficiencia en el uso del agua obtenida de la materia fresca del fruto por planta de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), durante el periodo experimental

Factor		Días después de iniciados los tratamientos "ddit"		
		15	30	45
Sustrato (A)	Tezontle	0.02539 ± 0.005b [∞]	0.02754 ± 0.006b	0.02651 ± 0.006b
	Composta	0.03367 ± 0.006a	0.03222 ± 0.004a	0.03131 ± 0.003a
HAR (B)	SPR80-30	0.03503 ± 0.002a	0.03588 ± 0.002a	0.03485 ± 0.001a
	SPR80-80	0.01963 ± 0.002b	0.02031 ± 0.001c	0.02117 ± 0.002b
	RC50	0.03859 ± 0.004a	0.03748 ± 0.001a	0.03482 ± 0.002a
	RC80	0.02486 ± 0.001b	0.02585 ± 0.001b	0.02482 ± 0.001b
F.V.		Valores de Fc		
A		19.01**	35.41**	35.38**
B		21.46**	45.22**	46.45**
A*B		2.29	4.54*	11.76**
C.V. (%)		18.2	11.5	10.0
Media general		0.029529	0.029882	0.028913

* = Significativo ($P \leq 0.05$) ** = Altamente Significativo ($P \leq 0.01$) [∞] = Los valores con las mismas literales son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)

Cuadro 14-A. Eficiencia en el uso del agua obtenida de la materia fresca total por planta de plantas de pimiento morrón en respuesta a dos tipos de sustrato y niveles de humedad aprovechable residual (HAR), durante el periodo experimental

Factor		Días después de iniciados los tratamientos "ddit"		
		15	30	45
Sustrato (A)	Tezontle	0.040221 ± 0.007b [∞]	0.036405 ± 0.008b	0.033628 ± 0.008b
	Composta	0.050218 ± 0.009a	0.042207 ± 0.005a	0.039648 ± 0.004a
HAR (B)	SPR80-30	0.052416 ± 0.003a	0.046959 ± 0.002a	0.044064 ± 0.001a
	SPR80-80	0.030985 ± 0.002b	0.026503 ± 0.001c	0.026512 ± 0.002b
	RC50	0.059901 ± 0.005a	0.049650 ± 0.002a	0.045066 ± 0.003a
	RC80	0.037575 ± 0.001b	0.034113 ± 0.001b	0.030910 ± 0.002b
F.V.		Valores de Fc		
A		16.97**	18.89*	33.00*
B		29.92**	46.55**	51.12**
A*B		3.23*	5.91**	9.21**
C.V. (%)		15.2	11.5	10.1
Media general		0.045219	0.039306	0.036638

* = Significativo ($P \leq 0.05$) ** = Altamente Significativo ($P \leq 0.01$) [∞] = Los valores con las mismas literales son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)