



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**DETERMINACIÓN DEL MOMENTO DE RIEGO
MEDIANTE LA TEMPERATURA DE LA COBERTURA FOLIAR
EN EL CULTIVO DE JITOMATE BAJO CONDICIONES DE
INVERNADERO**

MIGUEL ROJAS ACOSTA

**T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2009

La presente tesis titulada: **Determinación del momento de riego mediante la temperatura de la cobertura foliar en el cultivo de jitomate bajo condiciones de invernadero**, realizada por el alumno: **Miguel Rojas Acosta**, bajo la dirección del consejo particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO


DR. LEONARDO TUERINA CHÁVEZ

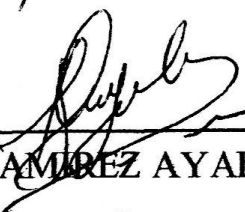
ASESOR


DR. RAMÓN ARTEAGA RAMÍREZ

ASESOR


DR. MARIO ALBERTO VÁZQUEZ PEÑA

ASESOR


DR. CARLOS RAMÍREZ AYALA

ASESOR


DRA. MA DE LOURDES DE LA ISLA DE BAUER

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS DEL APENDICE.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS DEL APENDICE.....	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	3
III. HIPÓTESIS.....	4
IV. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
4.1. El momento y Cantidad de Riego.....	5
4.1.1. Generalidades.....	5
4.1.2. Uso Consuntivo.....	7
4.2. El Agua en la planta.....	9
4.2.1 Potencial hídrico (Ψ) y sus componentes.....	10
4.3. Métodos Dieléctricos del Contenido de Agua en el Suelo.....	11
4.4. Déficit y Estrés Hídrico.....	12
4.4.1. Respuestas generales de las plantas al estrés hídrico.....	12
4.4.2. Estrategias frente al estrés hídrico.....	13
4.4.2.1. Resistencia al déficit hídrico.....	14
4.4.2.2. Respuestas fisiológicas del cultivo al déficit hídrico.....	15
4.4.2.2.1. Estomas.....	15
4.4.2.2.2. Transpiración.....	15

4.4.2.2.3. Conductancia estomática.....	16
4.4.2.2.4. Fotosíntesis.....	16
4.5. Eficiencia en el uso del agua.....	17
4.6. Temperatura Ambiental.....	17
4.6.1. Temperatura de las hojas.....	18
4.6.2. Temperatura del dosel.....	19
4.7. Termometría Infrarroja.....	20
4.7.1. Termómetros de infrarrojo en agricultura.....	21
4.8. Índices de Estrés Hídrico de Cultivos.....	23
4.8.1. Generalidades.....	23
4.8.1.1. Teoría del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI).....	25
4.9. Generalidades del Cultivo de Jitomate.....	27
4.9.1. Características botánicas.....	28
4.9.2. Requerimientos climáticos.....	29
4.9.3. Producción en invernadero.....	29
4.9.4. Nutrición de los cultivos en sus etapas fenológicas.....	30
4.9.5. Fenología vegetal.....	30
4.9.5.1. Etapas fenológicas del tomate.....	30
4.10. Sustratos Hidropónicos.....	31
4.10.1. Clasificación de materiales.....	31
4.10.1.1. Materiales orgánicos.....	32
4.10.1.2 Materiales inorgánicos.....	32
4.10.2. Materiales utilizados como componentes de sustratos.....	33
4.10.3. Propiedades de los sustratos.....	34
4.10.3.1. Propiedades físicas.....	34
4.10.3.1.1. Distribución del tamaño de poro.....	34
4.10.3.1.2. Densidad aparente.....	35
4.10.3.1.3. Conductividad hidráulica.....	36
4.10.3.1.4. Mojabilidad.....	36
4.10.3.1.5. Contracción de volumen.....	36
4.10.3.2. Propiedades fisico-químicas y químicas.....	37

4.10.3.2.1. Ph.....	37
4.10.3.2.2. Salinidad.....	38
4.10.3.2.3. Capacidad de intercambio catiónico.....	38
4.11. Producción de Biomasa.....	39
4.11.1. Producción primaria neta (Pn) ó materia seca acumulada total.....	39
4.12. Glosario de Términos de la Investigación.....	40
V. MATERIALES Y MÉTODOS.....	42
5.1. Ubicación del Experimento.....	42
5.2. Diseño Experimental y Tratamientos.....	42
5.2.1. Distribución de plantas en tratamientos.....	43
5.2.2. Análisis estadístico de tratamientos.....	46
5.3. Manejo del Cultivo.....	46
5.3.1. Siembra.....	46
5.3.2. Variedad utilizada.....	47
5.3.3. Transplante.....	47
5.3.4. Sustrato.....	48
5.3.5. Evapotranspiración.....	48
5.3.6. Riego.....	49
5.4. Solución Nutritiva.....	49
5.4.1. Salinidad del sustrato.....	52
5.5. Control Fitosanitario.....	52
5.6. Labores Culturales.....	52
5.7. Calibración de Equipos.....	53
5.7.1. Instalación de estación automática Davis.....	53
5.7.2. Calibración del TDR (Time Domain Reflectometry).....	54
5.7.3. Mediciones de la temperatura de la hoja.....	57
5.8. Manejo del Sustrato.....	58
5.8.1. Humedad a capacidad de campo en el sustrato.....	59
5.9. Cálculo de la Humedad Residual y Aprovechable.....	60

5.9.1. Cálculo de la humedad residual en función de la humedad aprovechable.....	60
5.10. Estimación de Láminas de Riego.....	62
5.10.1. Láminas de riego.....	62
5.10.2. Tiempo de riego.....	62
5.10.3. Frecuencia de riego.....	63
5.10.4. Obtención de calendarios de riego con datos observados.....	65
5.11. Estrés de la Planta.....	66
5.11.1. Variables meteorológicas registradas.....	66
5.11.2. Estrés de la planta y variables meteorológicas.....	67
5.11.2.1. Variables meteorológicas y temperatura foliar.....	68
5.11.2.2. Humedad, granulometría y temperatura foliar.....	68
5.12. Generación de Modelos de Temperatura Foliar.....	68
5.12.1. Modelos lineales de temperatura foliar.....	69
5.12.2. Validación de modelos de Temperatura Foliar.....	69
5.13. Desviación Absoluta Promedio (DAP).....	70
5.13.1. Cálculo de (DAP) para (Tf) y (Ta-Tf).....	70
5.13.2. Cálculo de (DAP) para (Ta-Tf).....	71
5.14.- Temperatura Foliar como Índice de Estrés Hídrico.....	71
5.15. Análisis de Variables Fisiotécnicas.....	72
5.15.1. Modelos de rendimiento.....	72
5.15.1.1. Evaluación y validación de modelos de rendimiento.....	72
5.16. Determinación del Momento de Riego.....	73

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	74
6.1. Análisis Estadístico de Tratamientos respecto a (Ta-Tf).....	74
6.2. Calendarios de Riego.....	75
6.3. Análisis de Variables Meteorológicas.....	78
6.3.1. Variables meteorológicas y temperatura foliar.....	79
6.4. Humedad del Sustrato y Temperatura Foliar.....	81
6.4.1. Granulometrías y temperatura foliar.....	82
6.4.2. Granulometrías y diferencias de temperatura (Ta-Tf).....	84
6.5. Estimación de la Temperatura Foliar como Índice de Estrés Hídrico.....	86
6.5.1. Modelos lineales de temperatura foliar.....	86
6.5.2. Temperaturas foliares generadas como índices de estrés hídrico.....	88
6.5.2.1. Evaluación y validación de modelos de temperatura foliar.....	92
6.6. Análisis de Variables Fisiotécnicas.....	95
6.6.1. Resumen de Análisis de Variables Fisiotécnicas.....	100
6.6.2. Análisis de varianza para la variable: rendimiento.....	102
6.7. Modelos de Rendimiento.....	104
6.7.1. Evaluación y validación de modelos de rendimiento.....	106
6.8. Momento de Riego.....	108
6.8.1. Comparación de resultados de investigación y el método CWSI....	112
VII. CONCLUSIONES.....	114
VIII. RECOMENDACIONES.....	116
IX. LITERATURA CITADA.....	117
X. APENDICE I.....	126
XI. APENDICE II.....	147

Índice de Tablas

Tabla 5-1: Factores y niveles considerados en la formación de tratamientos.....	43
Tabla 5-2. Nomenclatura y Composición de Tratamientos.....	44
Tabla 5-3 Balanceo de solución nutritiva.....	50
Tabla 5-4 Solución Nutritiva de Stainer al 100%.....	50
Tabla 5-5 Lecturas observadas en el TDR para diferentes porcentajes de humedad y el % de humedad estimada mediante modelo polinómico, para sustrato de granulometría fina.....	56
Tabla 5-6 Índices de humedad obtenidos por el método de las columnas.....	59
Tabla 5-7 Datos de laboratorio involucrados en estimación de humedad residual y aprovechable.....	60
Tabla 5-8 Resumen de parámetros de humedad calculados para los tres tratamientos de humedad y granulometrías considerados.....	61
Tabla 5-9 Cálculo de láminas, frecuencias y tiempos de riego en sustrato de granulometría fina $\varnothing \leq 2\text{mm}$	64
Tabla 5-9 Continuación.....	64
Tabla 5-10 Cálculo de láminas, frecuencias y tiempos de riego en sustrato de granulometría mediana $\varnothing 2-5\text{mm}$	64
Tabla 5-10 Continuación.....	64
Tabla 5-11 Cálculo de láminas, frecuencias y tiempos de riego en sustrato de granulometría gruesa $\varnothing \geq 5\text{mm}$	65
Tabla 5-11 Continuación.....	65
Tabla 5-12 Variables meteorológicas registradas en tiempo real por la estación meteorológica automática tipo Davis, variables del sustrato y del follaje.....	66
Tabla 6-1 Análisis de varianza para las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (T_a-T_f).....	74
Tabla 6-2 Prueba de medias para diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (T_a-T_f).....	75
Tabla 6-3 Modelos lineales generados que estiman la temperatura foliar en función del % de déficit de humedad, en tres diámetros de granulometría de sustrato.....	86

Tabla 6-4 Modelos lineales generados que estiman las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf) en función del % de déficit de humedad, en tres diámetros de granulometría de sustrato.....	87
Tabla 6-5 Modelos lineales generados que estiman el % de déficit de humedad, en función de la temperatura foliar en tres diámetros de granulometría de sustrato.....	87
Tabla 6-6 Modelos lineales generados que estiman el % de déficit de humedad, en función de las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf) en tres diámetros de granulometría de sustrato.....	87
Tabla 6-7 Valores de temperatura foliar, estimados para tres diámetros de granulometría de sustrato en función del porcentaje de déficit de humedad	89
Tabla 6-8 Valores de diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf) estimados para tres diámetros de granulometría de sustrato en función del % de déficit de humedad	90
Tabla 6-9 Comparación de porcentajes de déficit de humedad, estimados con modelo base y temperatura foliar para tratamientos con diámetro de granulometría diferente.....	93
Tabla 6-10 Comparación de porcentajes de déficit de humedad, estimados con modelo base y diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf) para tratamientos con diámetro de granulometría diferente	94
Tabla 6-11 Análisis de varianza para la variable: rendimiento de jitomate en kg.....	102
Tabla 6-12 Prueba de medias para la variable: rendimiento de jitomate en kg.....	103
Tabla 6-13 Valores de temperatura foliar (Tf), evaluados en el modelo $Y = -0.01X^2 + 0.3664X + 0.0895$, para estimación de rendimientos de jitomate.....	106
Tabla 6-13a Estimación de rendimientos de jitomate por planta en kg, en función de la temperatura foliar (Tf) en °C.....	107
Tabla 6-14 Diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf), en °C, evaluados en el modelo $Y = -0.0113 X^2 + 0.3658X + 0.4467$, para estimación de rendimientos jitomate.....	107
Tabla 6-14a Estimación de rendimientos de jitomate en función de (Ta-Tf) en °C.....	107
Tabla 6-14b Desviación Absoluta Promedio en % para modelos de Rendimiento en función de valores de temperatura foliar y (Ta-Tf).....	107

Tabla 6-15 Valores de temperatura foliar (Tf) medidos a las 14:00 pm, que indican el momento de riego para consumo permisible de 70, 40 y 25 % de déficit de humedad del sustrato en el cultivo de jitomate según USDA y resultados de la investigación.....	110
Tabla 6-16 Valores de (Ta-Tf) medidos a las 14:00 pm, que indican el momento de riego para consumo permisible de 70, 40 y 25 % de déficit de humedad del sustrato en el cultivo de jitomate según USDA y resultados de la investigación.....	111
Tabla 6-17. Comparación entre parámetros que indican el momento de riego resultados de esta investigación, consumo mínimo permisible según USDA, y valores umbrales del índice de estrés hídrico CWSI, obtenidos por varios investigadores en diferentes cultivos agrícolas, incluyendo al jitomate para la programación del riego.....	113

Índice de Figuras

Fig. 5-1 Invernadero donde se desarrolló el experimento.....	42
Fig. 5-1a Distribución de tratamientos en el invernadero.....	45
Fig. 5-2 Distribución de plantas en el invernadero.....	46
Fig. 5-3 Almácigo de plantas de jitomate en charolas de unicel.....	47
Fig. 5-4 Transplante de plantas de jitomate en tezontle rojo.....	47
Fig. 5-5 Tezontle rojo con tres diámetros de granulometría usados en el experimento.....	48
Fig. 5-6 Tanque evaporímetro tipo A utilizado en la investigación.....	48
Fig. 5-7 Riego por goteo con sistema tipo espagueti sobre contenedores de sustrato..	49
Fig. 5-8a Depósitos usados para la solución nutritiva.....	51
Fig. 5-8b Sistema de conducción del agua con solución nutritiva para el experimento.....	51
Fig. 5-8c Cantidades y tipos de fertilizantes usados en la solución nutritiva.....	52
Fig. 5-9a Instalación de estación automática Davis mostrando sensores de temperatura y radiación solar.....	53
Fig. 5-9b Monitoreo en tiempo real de variables meteorológicas del invernadero con programa Grow.....	53
Fig. 5-10 Calibración del TDR en tezontle rojo para diferentes porcentajes de humedad.....	56
Fig. 5-11 Curva polinómica ajustada y estimación del % de humedad en función de lecturas del TDR.....	57
Fig. 5-12 Toma de datos de temperatura foliar y humedad del sustrato de forma simultánea.....	57
Fig. 5-13 Tratamientos probados de granulometrías de sustrato.....	58
Fig. 5-14 Determinación de capacidad de campo en tezontle con granulometría fina con método empírico, en cinco muestras por tratamiento.....	59
Fig. 6-1 Calendario de riego tratamiento: T1, 75 % humedad residual, para lámina de riego de 0.52 cm con (Ta-Tf) de (11.3 a 11.9) °C y (Tf) de (23.6 a 25.2) °C. Del 28 de mayo al 01 de junio de 2007.....	76

Fig. 6-2 Calendario de riego tratamiento: T4, 45 % humedad residual para lámina de riego de 1.15 cm con (Ta-Tf) de (6.2 a 6.8) °C y (Tf) de (27.4 a 29) °C. Del 29 de mayo al 18 de junio de 2007.....	76
Fig. 6-3 Calendario de riego tratamiento: T7, 15 % humedad residual para lámina de riego de 1.78 cm con (Ta-Tf) de (1.2 a 1.5) °C y (Tf) de (34.6 a 35.7) °C. Del 31 de mayo al 24 de julio de 2007.....	77
Fig. 6-4 Comportamiento de variables meteorológicas promediadas obtenidas dentro del invernadero.....	78
Fig. 6-5 Comportamiento de variables meteorológicas promediadas, registradas dentro del invernadero en relación con temperaturas foliares para tratamientos de humedad en tezontle fino diámetro menor, igual a 2 mm.....	80
Fig. 6-6 Comportamiento de variables meteorológicas, registradas dentro del invernadero en relación con diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf) para tratamientos de humedad en tezontle fino, diámetro menor, igual a 2 mm.....	80
Fig. 6-7 Temperaturas del aire y follaje para tres tratamientos con 75, 45, 15, 100 a 95 y 10 a 5 % de humedad residual en sustrato fino, diámetro de granulometría menor, igual a 2 mm. Datos de todo el ciclo del cultivo.....	81
Fig. 6-8 Temperaturas del aire y follaje para tres repeticiones del tratamiento con 75% de humedad residual y diferentes diámetros de granulometrías del sustrato.....	83
Fig. 6-9 Comparación de temperaturas del aire y follaje para tres Tratamientos con 75, 45 y 15 % de humedad residual con diferentes Granulometrías de sustrato	83
Fig 6-10 Diferencias de temperatura entre el aire y el follaje para cinco tratamientos con 75, 45, 15, 100 a 95 y 10 a 5 % de humedad residual en tezontle con granulometría fina diámetro menor, igual a 2 mm.....	84
Fig. 6-11 Comparación de diferencias de temperatura entre el aire y el follaje para tres tratamientos y tres repeticiones con 75, 45 y 15 % de humedad residual con diferente granulometría del sustrato, respecto a tratamientos de humedad extrema (CC y PMP), con 100 a 95 y 10 a 5 % de humedad residual respectivamente.....	85
Fig. 6-12 Comparación de valores de temperatura foliar, estimados por modelos generados, para porcentajes de déficit de humedad y diferentes granulometrías de sustrato	89
Fig. 6-13 Comparación de valores de diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf), estimados por modelos generados, para porcentajes de déficit de humedad y diferentes granulometrías de sustrato.....	91

Fig. 6-14 Comparación de porcentajes de déficit de humedad, estimados con modelo base en función de la temperatura foliar (T_f) en diferentes granulometrías de sustrato	93
Fig. 6-15 Comparación de porcentajes de déficit de humedad, estimados con modelo base en función de las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje ($T_a - T_f$) en diferentes granulometrías de sustrato.....	94
Fig. 6-16 Comparación de biomasa acumulada total (incluyendo frutos y raíces), entre tratamientos de humedad y granulometrías respecto a tratamientos de humedad extrema: a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).....	96
Fig. 6-17 Comparación de materia seca acumulada total (incluyendo frutos y raíces), entre tratamientos de humedad y granulometrías respecto a tratamientos de humedad extrema: a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).....	97
Fig. 6-18 Comparación de área foliar total entre tratamientos de humedad y granulometrías respecto a tratamientos de humedad extrema: a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).....	98
Fig. 6-19 Determinación de superficie de hojas mediante el uso del integrador de área foliar.....	98
Fig. 6-20 Comparación de rendimiento de jitomate promedio por planta entre tratamientos de humedad y granulometrías respecto a tratamientos de humedad extrema: a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).....	99
Fig. 6-21 Fruto de jitomate cosechado para un corte.....	99
Fig. 6-22 Relación entre temperatura foliar (T_f) en °C y rendimiento de jitomate en Kg para tratamientos de humedad en tezontle fino, diámetro menor, igual a 2 mm	105
Fig. 6-23 Relación entre valores de diferencias de temperatura entre el aire y el follaje ($T_a - T_f$) en °C y rendimiento de jitomate para tratamientos de humedad en tezontle fino, diámetro menor, igual a 2 mm	105

ÍNDICE DE TABLAS DEL APENDICE

Tabla 1. Datos promedio de variables meteorológicas registradas en tiempo real dentro del invernadero.....	126
Tabla 2. Datos promedio de temperaturas del aire y el follaje para tres tratamientos de humedad en sustrato de tezontle con granulometría fina.....	127
Tabla 3. Datos promedio de diferencias de temperatura entre el aire y el follaje para tres tratamientos de humedad en sustrato de tezontle con granulometría fina.....	128
Tabla 4. Datos promedio de temperaturas del aire y el follaje para tres tratamientos de humedad en sustrato de tezontle con granulometría mediana.....	129
Tabla 5. Datos promedio de diferencias de temperatura entre el aire y el follaje para tres tratamientos de humedad en sustrato de tezontle con granulometría mediana.....	130
Tabla 6. Datos promedio de temperaturas del aire y el follaje para tres tratamientos de humedad en sustrato de tezontle con granulometría gruesa.....	131
Tabla 7. Datos promedio de diferencias de temperatura entre el aire y el follaje para tres tratamientos de humedad en sustrato de tezontle con granulometría gruesa.....	132
Tabla 8. Requerimientos y frecuencias de riego para el tratamiento de humedad T1(100-75% de humedad) en tezontle fino.....	133
Tabla 8. Continuación.....	134
Tabla 9. Lecturas del TDR de humedad del sustrato y de temperatura foliar registradas a las 14:00 p.m, para T1(100-75 % de Humedad Residual), con granulometría fina para una lámina de riego de 0.5228 cm.....	135
Tabla 10. Lecturas del TDR de humedad del sustrato y de temperatura foliar registradas a las 14:00 p.m, para T4(100-45 % de Humedad Residual), con granulometría fina para una lámina de riego de 1.1563 cm.....	136
Tabla 11. Lecturas del TDR de humedad del sustrato y de temperatura foliar registradas a las 14:00 p.m, para T7(100-15 % de Humedad Residual), con granulometría fina para una lámina de riego de 1.7857 cm.....	136
Tabla 12. Lecturas del TDR de humedad del sustrato y de temperatura foliar registradas a las 14:00 p.m, para (PMP) T11(100-5 % de Humedad Residual), con granulometría fina para una lámina de riego de 2.099 cm.....	137

Tabla 13. Lecturas del TDR de humedad del sustrato y de temperatura foliar registradas a las 14:00 p.m, para (CC) T10 (100-95% de Humedad Residual constante), con granulometría fina para una lámina de riego de 0-0.104cm.....	137
Tabla 14. Cálculo del DAP para los datos observados y estimados de (Ta-Tf) en función del % de déficit de humedad.....	138
Tabla 15. Cálculo del DAP para los datos observados y estimados del % de Déficit de humedad en función de (Ta-Tf).....	138
Tabla 16. Cálculo del DAP para los datos observados y estimados del % de Déficit de humedad en función de la temperatura foliar.....	138
Tabla 17. Prueba de medias para diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf). Mediante el método de la diferencia mínima significativa modificada (DMS).....	139
Tabla 18. Datos para análisis de varianza de (Ta-Tf) en°C.....	140
Tabla 19. Información de temperatura foliar (Tf), (Ta-Tf) y evapotranspiración acumulada (Et), utilizada en el cálculo del calendario y frecuencia de riego para el tratamiento T1, 75 % humedad residual, $\emptyset \leq 2\text{mm}$. Datos iniciales del experimento del 28 de mayo al primero de junio de 2007.....	140
Tabla 20. Información de temperatura foliar (Tf), (Ta-Tf) y evapotranspiración acumulada (Et), utilizada en el cálculo del calendario y frecuencia de riego para el tratamiento T4, 45 % humedad residual, $\emptyset \leq 2\text{mm}$. Datos iniciales del experimento del 29 de mayo al 18 de junio de 2007.....	140
Tabla 21. Información de temperatura foliar (Tf), (Ta-Tf) y evapotranspiración acumulada (Et), utilizada en el cálculo del calendario y frecuencia de riego para el tratamiento T7, 15 % humedad residual, $\emptyset \leq 2\text{mm}$. Datos iniciales del experimento del 31 de mayo al 24 de julio de 2007.....	141
Tabla 22. Temperaturas promedio del aire y el follaje para tratamientos de humedad extrema con granulometría fina $\emptyset \leq 2\text{mm}$	142
Tabla 23. Temperaturas promedio del aire, el follaje (Tf) y (Ta-Tf) para tratamientos de humedad extrema con granulometría fina $\emptyset \leq 2\text{mm}$	143
Tabla 24. Prueba de medias para la variable: rendimiento de jitomate en Kg. Mediante el método de la diferencia mínima significativa modificada (DMS).....	144
Tabla 25. Datos para análisis de varianza de rendimiento de jitomate en Kg.....	145
Tabla 26. Materiales empleados en la realización de la investigación.....	146

ÍNDICE DE FIGURAS DEL APENDICE

Fig.1 Comportamiento de datos promedio de evapotranspiración (ET) y evaporación (EV) de mayo a septiembre de 2007 de la estación automática y tanque evaporímetro dentro del invernadero.....	147
Fig.2 Comportamiento de temperaturas promedio de mayo a septiembre De 2007 del aire y follaje para tratamiento control a PMP en tezontle granulometría fina.....	147
Fig. 3 Comportamiento de temperaturas promedio de mayo a Septiembre de 2007 del aire y follaje para tratamiento control a CC en tezontle granulometría fina.....	148
Fig. 4 Diferencias de temperatura del follaje, respecto al aire para tres repeticiones del tratamiento con 75 % de humedad residual y diferentes granulometrías del sustrato de mayo a septiembre de 2007.....	148
Fig. 5 Relación entre el % de déficit de humedad del sustrato y la temperatura del follaje en tezontle granulometría fina menor, igual a 2 mm.....	149
Fig. 6 Relación entre el % de déficit de humedad del sustrato y las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf) en tezontle granulometría fina menor, igual a 2 mm.....	149
Fig. 7 Estimación del % de déficit de humedad en función de la temperatura foliar en tezontle granulometría fina menor, igual a 2 mm.....	150
Fig. 8 Estimación del % de déficit de humedad del sustrato, en función de las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf), en tezontle granulometría fina, menor, igual a 2mm.....	150
Fig. 9 Estimación de la temperatura foliar en función del % de déficit de humedad del sustrato, en tezontle granulometría fina, menor, igual a 2mm.....	151
Fig. 10 Estimación de las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf), en función del % de déficit de humedad del sustrato, en tezontle granulometría fina, menor, igual a 2mm.....	151
Fig. 11 Comparación de longitud de raíces entre tratamientos de humedad y granulometrías de sustrato respecto a tratamientos de humedad extrema a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).....	151

DETERMINACIÓN DEL MOMENTO DE RIEGO MEDIANTE LA TEMPERATURA DE LA COBERTURA FOLIAR EN EL CULTIVO DE JITOMATE BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO.

Miguel Rojas Acosta, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2009

Si el agua no es aplicada en tiempo y forma a los cultivos agrícolas, se corre el riesgo de que éstos sufran de estrés hídrico, cuyas consecuencias pueden reflejarse en el rendimiento y calidad del fruto. Para determinar el momento de riego en el presente trabajo se propone la generación de modelos lineales, a través del manejo de un equipo detector de humedad (TDR), termómetro infrarrojo y estación meteorológica automatizada. La investigación se llevó a cabo en un invernadero del Colegio de Postgraduados, ubicado en el Campus Montecillo, Estado de México. Para analizar el estrés de la planta, se estableció un experimento con plantas de jitomate en sustratos con diferente diámetro de partículas, estas fueron: fina menor, igual a 2mm, media de 2 a 5mm y gruesa de 5mm. Para analizar el estrés hídrico de las plantas de jitomate se manejaron tres niveles de agua disponible en cada sustrato (15%, 45% y 75%) generando nueve tratamientos, combinando tres diámetros de partículas del sustrato. Adicionalmente fueron establecidos dos tratamientos: uno a capacidad de campo y el otro a punto de marchitez permanente. El déficit hídrico de cada sustrato y diámetro de partículas se relacionó con la temperatura de la cobertura foliar. Se obtuvieron datos de temperatura del aire circundante a nivel horario en tiempo real durante todo el ciclo fenológico del cultivo. Las pruebas de ajuste aplicadas a los modelos obtenidos fueron la desviación absoluta promedio (DAP) y la (R^2). El momento de riego se estableció al asociar los valores de temperatura foliar y de (T_a-T_f) estimados, con los parámetros de déficit de humedad para un consumo permisible de 30 a 60 % de la humedad aprovechable. De los resultados obtenidos, se observó que existen diferencias marcadas en las temperaturas foliares entre tratamientos de humedad y que un mismo tratamiento de humedad manejado con diámetros de granulometría diferentes, también presenta valores diferentes de temperatura. De los modelos generados para estimar temperatura foliar (T_f) y (T_a-T_f) los que resultaron con mejores ajustes fueron: a) $Y=6.5462X-133.76$, donde Y = déficit de humedad del sustrato; X = temperatura foliar y b) $Y= -6.4084X+97.21$ donde Y = % de déficit de humedad para sustrato fino; X = diferencias de temperatura entre el aire y el follaje. Del análisis de las variables biofísicas se observó que altas temperaturas foliares indican bajo nivel de humedad, alto déficit hídrico y rendimientos bajo del cultivo. De acuerdo con el análisis de varianza, el momento de riego para el cultivo de jitomate quedó definido por el % de déficit de humedad en los rangos de (24.8 a 24.7) y (75.2 a 75.3) % de humedad aprovechable, cuando la temperatura foliar alcanza un valor promedio de 24.2 °C y una diferencia de temperatura entre el aire y el follaje (T_a-T_f) de 11.3 °C.

Se concluye que la temperatura foliar constituye un indicador práctico del estrés hídrico, el cual presenta una relación directamente proporcional con el déficit hídrico e inversamente proporcional con la producción y rendimiento del cultivo. El momento de riego depende de la observación de los valores de temperatura foliar (T_f) y diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (T_a-T_f) acotados dentro de los límites de capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

Palabras clave: estrés hídrico, momento de riego, termómetro infrarrojo, temperatura foliar, sustrato.

DETERMINATION OF IRRIGATION MOMENT BY MEANS OF LEAF COVER TEMPERATURE IN TOMATO CROP UNDER GREEN HOUSE CONDITIONS.

Miguel Rojas Acosta, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2009

If the water is not applied on time and form to agricultural crops, the risk is that those suffer of water stress, whose consequences can be reflected in the yield and quality of the fruit. To determine the time of irrigation in the present work proposes the generation of linear models of operation of a detector equipment humidity (TDR), infrared thermometer and automated weather station. The investigation was carried out in a greenhouse located at Montecillo Campus of the Colegio of Postgraduados, located at the Mexico State. To analyze the plant water stress, it was established an experiment with tomato crop planted on a substrate with different particle sizes diameters: lower than 2 mm, medium 2-5, and larger 5 mm. To analyze water stress of tomato plants was imposed handling three levels of easy available water in each substrate (15 %, 45 % and 75 %) generating nine treatments, combining three granulometric particle size with three water availability levels. Additionally were established two treatments: one maintaining the substrate at field capacity and the other only received one irrigation at the beginning of the experiment. Water deficit of each granulometric substrate were related with the temperature of the leaf cover, also air temperature were recorded in real time in hourly bases with an automated agrometeorological station throughout the crop cycle. The Adjustment tests models were the absolute average deviation (DAP) and (R^2). The irrigation time were established when associating values leaf temperature and ($T_a - T_f$) estimated with the parameters water deficits for a permissible consumption from 30 to 60 % of available water. The results shown appreciable temperature differences between the leaf cover and each substrate water content treatments. The substrates of different granulometric diameters, also present different temperature value. The generated models for estimating foliar temperature (T_f) and ($T_a - T_f$) which were adjustments were: a) $Y = 6.5462X - 133.76$, where Y = water deficit of the substrate; X = leaf temperature and b) $Y = -6.4084X + 97.21$ where Y = % of humidity deficit for fine substrate; X = temperature differences between the air and leaf cover. From the analysis of the biophysics variables it is observed that high leaf temperatures indicate low water level in the substrate, high water deficit and promoting stop growth and predicts lower crop yields. According to the variance analysis, the irrigation time for tomato crop was defined by the % of humidity deficit ranks from (24.8 to 24.7) and (75.2 to 75.3) % available humidity, when the leaf temperature reaches an average value of 24.2°C and a temperature difference between the air and leaf cover ($T_a - T_f$) to 11.3°C . It is concluded that leaf temperature constitutes a practical indicator of the water stress, which is directly related with the water status of the plants and inversely proportional the water deficit with the production and the crop yield. The irrigation time depends on the observation of the values (T_f) leaf temperature and temperature differences between the air and leaf temperature ($T_a - T_f$) within the limits between field capacity and wilting point.

Key words: water stress, irrigation time, infrared thermometer, leaf temperature, substrate

I. INTRODUCCIÓN

Los cultivos agrícolas, en su periodo de desarrollo, necesitan continuamente agua, pero la magnitud de sus necesidades varía con la clase de cultivo, su edad, la temperatura y las condiciones atmosféricas.

Si el agua no es aplicada oportunamente, se corre el riesgo de que la planta sufra de estrés hídrico, cuyas consecuencias pueden reflejarse en el rendimiento y calidad del fruto.

Sin embargo, también es conocido, que el estado de estrés en la planta puede deberse tanto a un desbalance hídrico como nutricional, así como a la presencia de enfermedades y contaminación ambiental, o la combinación de cualquiera de las anteriores; lo cual conlleva a la presencia de alteraciones generales en la fisiología de la planta.

Una vez conocida la cantidad de agua que se debe aplicar a un cultivo, es necesario saber el momento de dicha aplicación. Para conocer el momento de riego, tradicionalmente se ha recurrido a la determinación del contenido de humedad del suelo o del sustrato en el caso de cultivos hidropónicos, mediante muestreos puntuales, para ello se han empleado diversos métodos, entre los que destacan: el método gravimétrico, el uso de tensiómetros y bloques de resistencia eléctrica. Métodos que manejados detalladamente proporcionan buenos resultados, pero que en la práctica son más laboriosos en tiempo y manejo. Por lo que se hace necesario la investigación de metodologías prácticas pero eficientes que estimen el déficit hídrico en el sustrato de la planta que permitan conocer dentro de cierto rango de tolerancia el momento de aplicación del agua al cultivo que evite situaciones de estrés hídrico.

Al respecto, un método de determinación del momento de riego que actualmente ha cobrado importancia por ser sencillo y práctico, es el que consiste en obtener la temperatura de la hoja por medio de termómetro de rayos infrarrojos, que permite medir la diferencia entre la temperatura del aire y la del follaje; esta diferencia de temperaturas, de acuerdo a varias investigaciones, está directamente relacionada con el déficit hídrico en los cultivos agrícolas, por lo que se ha considerado como un indicador de las condiciones de estrés de la planta que generalmente se asocia con problemas en el suministro del agua.

Con base en lo anterior, y en el entendido de que el objetivo primario del riego es el de surtir a las plantas con agua suficiente para obtener rendimientos óptimos y de alta calidad en los productos cosechados y que para decidir sobre el momento de riego,

generalmente se define un consumo permisible, y que este es el contenido mínimo de agua en el suelo o sustrato, permitido antes del riego, de manera que no se presenten condiciones desfavorables de tensión de humedad para el cultivo; en este trabajo se analizaron una serie de relaciones entre variables meteorológicas, edáficas y fisiotécnicas registradas dentro de un invernadero, con lo cual se generaron modelos lineales para estimar el déficit de humedad del sustrato en función de la temperatura foliar, considerando a esta variable como indicadora de estrés hídrico, para conocer el momento de riego, así como la estimación de rendimientos en el cultivo de jitomate manejando un equipo detector de humedad (TDR), termómetro de infrarrojo, una estación meteorológica automatizada, tezontle rojo como sustrato y plantas de jitomate.

II. OBJETIVOS

2.1. GENERAL

2.1.1. Determinar el momento de riego en el cultivo de jitomate bajo condiciones de invernadero, en base a la temperatura foliar, determinada mediante termometría infrarroja.

2.2. ESPECÍFICOS

2.2.1. Analizar el comportamiento de variables meteorológicas registradas en el invernadero durante las etapas de desarrollo del cultivo, hasta el momento de la cosecha.

2.2.2. Analizar la temperatura foliar registrada en tratamientos con porcentajes de humedad equivalente, establecidos sobre sustratos de tezontle con diferente diámetro de granulometría.

2.2.3. Generar modelos lineales, con base en la temperatura foliar y las diferencias de temperatura, entre la hoja y el aire que la circunda, que estimen la humedad presente en el sustrato, a través de termometría infrarroja.

2.2.4. Analizar la relación entre los rendimientos de fruto fresco del cultivo con la temperatura foliar, comparados con tratamientos con humedad extrema.

III. HIPÓTESIS

3.1. GENERAL

3.1.1. Es posible determinar el momento de riego en un cultivo, mediante la obtención de valores de temperatura foliar y diferencias de temperatura entre el aire y la cobertura foliar, asociados a contenidos hídricos específicos en el sustrato.

3.2. ESPECÍFICAS

3.2.1. Las variables meteorológicas registradas dentro de un invernadero se relacionan entre sí de forma diferente y condicionan el comportamiento de la temperatura foliar

3.2.2. Existe variación de la temperatura foliar entre tratamientos manejados en sustratos de tezontle con diferentes diámetros de granulometría.

3.2.3. La temperatura foliar y la diferencia de temperaturas entre el aire y la hoja constituyen índices de estrés hídrico prácticos a través de los cuales es posible estimar el contenido de humedad del sustrato en un momento determinado.

3.2.4. Existe una relación inversamente proporcional entre el estrés hídrico y los rendimientos de fruto fresco del cultivo.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. El momento y Cantidad de Riego

4.1.1. Generalidades

El objetivo primario del riego es el de abastecer a las plantas con agua suficiente para obtener rendimientos óptimos y de alta calidad en los productos cosechados. La oportunidad y la cantidad de agua aplicada se determina en función de las condiciones climáticas que prevalecen en la zona de estudio, el cultivo y su etapa de desarrollo, las propiedades de los suelos (tales como la capacidad de almacenamiento de agua), y la profundidad del sistema radicular (USDA.S/F).

Todos los cultivos tienen periodos críticos de crecimiento, y en este lapso pequeños esfuerzos en la humedad del suelo pueden impactar el rendimiento y la calidad de los productos. Los periodos de necesidades críticas de agua varían de un cultivo a otro. La humedad del suelo en estos periodos críticos debe mantenerse a niveles suficientes para garantizar que las plantas no estén sujetas a esfuerzos por la falta de agua (USDA.S/F).

Para decidir sobre la oportunidad del riego, generalmente se define en primer lugar un consumo permisible, y este es el contenido mínimo de agua en el suelo, permitido antes del riego, de manera que no se presenten condiciones no deseables de tensión de humedad para el cultivo. Para prevenir reducciones en el rendimiento o la calidad del producto, este deberá regarse antes de que un cierto porcentaje del agua disponible en el suelo sea utilizado por dicho cultivo. Históricamente se ha aceptado una disminución entre 30 a 60 % de la humedad aprovechable para propósitos de buen manejo del riego. El suelo podrá regarse antes de alcanzar la disminución permisible, si la cantidad de agua aplicada no excede la capacidad de campo en la zona de la profundidad radicular (USDA.S/F).

Una vez determinada la cantidad de agua que hay que reponerle al cultivo para su óptimo desarrollo y mejorar los rendimientos, surge la necesidad de abastecerlo en tiempo y forma adecuada con el fin de que la planta esté siempre hidratada, pero con el mínimo exceso para evitar el lavado de sales y por consecuencia un ahorro sensible en el consumo del recurso agua y nutrientes que por esta vía se administran (Flores, 2005).

Tijerina (2005) menciona que los fundamentos de la calendarización del riego se basan en entender como es la relación entre el estatus del agua en las hojas con el estatus del agua en el suelo, por lo que a medida que el agua del suelo es consumida por evapotranspiración, el potencial de agua en el suelo (Ψ_s) baja, y que consecuentemente el potencial del agua en la hoja (Ψ_h) también baja.

Las plantas consumen grandes volúmenes de agua, por cada producto agrícola se requieren varios cientos de kilogramos de agua. Ojeda et. al, (2004), menciona que se requieren alrededor de 100 kg de agua para producir un kilogramo de azúcar.

El mismo autor menciona que para producir 10 toneladas de maíz, valor por arriba del promedio por hectárea en la mayor parte del país, es necesario alrededor de 6000 m³ de agua que corresponden a una lamina total en el ciclo fisiológico del maíz de 600 mm y al final se tendrán 2 m³ de agua en 10 ton de maíz con una humedad de grano del 20 %.

Flores (2005), indica que la calendarización del riego se basa comúnmente en la verificación rutinaria de la humedad del suelo en la zona radical durante el ciclo del cultivo y que cuando se usa la cantidad de humedad en el suelo como indicador para la calendarización del riego, considera mantener el suelo o sustrato con humedad que pueda ser aprovechada por la planta.

El mismo autor menciona que los sensores que miden el contenido de agua en el suelo o sustrato permiten conocer como el cultivo va extrayendo el agua del suelo, de forma que el riego puede programarse para mantener un contenido de agua en el suelo entre dos niveles de humedad, y que el equipo usado para medir el contenido de agua es variable entre los cuales se encuentran: tensiometros, time domain reflectometry, watermark, y bloques de yeso, pero que sin embargo su uso está supeditado entre otras características, al tipo de sustrato, frecuencia de riegos, y profundidad de raíces.

4.1.2. Uso Consuntivo

El uso consuntivo se define como la cantidad de agua que es necesario suministrar al suelo con la finalidad de satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos, la cual va a ser utilizada durante todo el ciclo vegetativo en la formación de los tejidos de las plantas (H_2O Tej), en la transpiración de las mismas (T) y en la evaporación directa del suelo (Ev_s). Por lo tanto, se puede expresar como: $UC = T + Ev_s + H_2O \text{ Tej}$. “El término *consumptive use of water*” traducido “como uso consuntivo del agua” fue empleado por primera vez por John E. Field, con la finalidad de mencionar el agua consumida por un cultivo para satisfacer los conceptos antes mencionados (De la Peña. 2001).

La evapotranspiración es la combinación de los fenómenos de evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación. La dificultad de la medición en forma separada de ambos fenómenos (el contenido de humedad del suelo y el desarrollo vegetal de la planta) obliga a introducir el concepto de evapotranspiración como pérdida conjunta de un sistema determinado. Al respecto, Thornthwaite (1948) introduce un nuevo concepto optimizando ambos, es la llamada evapotranspiración potencial o pérdidas por evapotranspiración, en el doble supuesto de un desarrollo vegetal óptimo a una capacidad de campo permanente. Este autor designa así a la lámina de agua que sería efectivamente evaporada si los recursos de agua movilizables en la cuenca fueran en cada instante por lo menos iguales a los que pueden ser transformados en vapor por el juego de los factores hidrometeorológicos y la vegetación.

Penman define como “evapotranspiración potencial”, al consumo de agua de un cultivo que cubre totalmente la superficie del suelo sin ninguna deficiencia de humedad durante su desarrollo. Al respecto, puede señalarse que existe cierta diferencia con la evapotranspiración de los cultivos normales, ya que éstos en muy pocas ocasiones encuentran circunstancias tan favorables. Los principales factores que influyen en el valor del uso consuntivo y especialmente en sus dos componentes más importantes que son la transpiración y la evaporación directa del suelo, son: las características del suelo, los elementos del clima, las características del cultivo, así como el agua de riego y su manejo (De la Peña. 2001).

En términos generales, el agua requerida por los cultivos, es equivalente a la tasa de evapotranspiración necesaria para sostener un óptimo crecimiento de la planta. Más aún, el agua requerida es definida como la tasa de evapotranspiración de un cultivo libre de enfermedades, en una superficie no menor que una hectárea bajo óptimas condiciones de suelo, se asume fertilidad adecuada, agua para alcanzar la máxima producción potencial bajo las condiciones predominantes del medio ambiente (FAO, 1976).

Tijerina (1992) citó que los principales factores de las plantas que afectan la evapotranspiración son: el grado de cobertura, el área foliar, la altura del cultivo, la rugosidad de la cobertura y el control estomático de la transpiración. Y los factores del suelo que afectan la evapotranspiración son: el contenido de humedad, la profundidad del manto freático y desde luego la salinidad.

Dorembos y Pruitt (1977) definen a la evapotranspiración de referencia (E_{To}) como el volumen de agua consumido por un pasto verde de 8 a 15 cm de altura uniforme, en crecimiento activo, sobre toda la superficie del suelo, el cual no se encuentra sometido a condiciones de deficiencia de humedad en el suelo.

Según Ortiz (1987) indica que la evapotranspiración real (E_{Tr}), es la cantidad de agua perdida por el complejo suelo-planta en las condiciones meteorológicas, edáficas y biológicas existentes.

Shuttleworth (1985) define la evapotranspiración de un cultivo de referencia (E_{To}) como la tasa de evaporación de un pasto idealizado con una altura fija de 12 cm, un albedo de 0.23 y una resistencia superficial de 69 s/m. Mientras que para Allen (1998), considera que la resistencia será de 70 s/m, que corresponde a una superficie de suelo semiseca, producto de una frecuencia de riego semanal.

López-Gálvez y López-Hernández (1991) indican que en la actualidad existe una gran cantidad de métodos indirectos que permiten estimar la evapotranspiración a partir de variables meteorológicas y que dichos métodos involucran el empleo de ecuaciones empíricas, las cuales requieren de información climatológica fácil de conseguir y, por tanto, tienen gran utilidad en la planeación agrícola.

Rosemberg et. al., (1983), mencionan que los métodos micrometeorológicos estiman la evapotranspiración (ET) en cortos intervalos de tiempo (menores que 30 min.), por lo que permiten estimar este parámetro en tiempo real. Dentro de estos métodos se encuentran los que se basan en el balance de energía, como el método de la relación de Bowen; dentro de los aerodinámicos están los que se basan en el transporte de masa como el caso del método de Thornthwaite-Holzman, y los métodos de correlación de transporte turbulento (Flores, 2005).

El método del Tanque tipo A, corresponde a la evaporación que acontece desde un tanque evaporimétrico de superficie libre de determinadas dimensiones, para el cual, múltiples estudios han demostrado que la evaporación del tanque, integra apropiadamente las variables climáticas de temperatura, radiación solar, humedad relativa y las características del viento del sector, que son los elementos de los cuales depende en mayor grado la evapotranspiración de los cultivos (Tosso y Ferreira, 1988).

El tanque evaporímetro tipo A, corresponde a un recipiente cilíndrico de 0.8 mm de espesor, con un diámetro interior de 121 cm, y una altura de 25 cm., la estructura se instala sobre apoyos de madera 15 cm por encima del suelo, el espacio que queda bajo los apoyos debe llenarse con tierra, de tal manera que quede un espacio libre de solo 5 cm bajo el fondo del tanque. El recipiente se llena de agua limpia dejando un borde que oscila entre 5 y 7.5 cm y se rellena cada 24 horas utilizando envases de 0.1 y 1 litro. Cabe destacar que un litro equivale a un milímetro de evaporación del tanque. (Ortega y Acevedo, 1999).

4.2. El Agua en la Planta:

El agua que es el componente mayoritario en la planta (de 80 a 90 % del peso fresco en plantas herbáceas, y más de 50 % en las partes leñosas), afecta directa o indirectamente a la mayoría de los procesos fisiológicos (Kramer, 1989; Sánchez y Aguirreola, 1996), y es el factor ambiental más importante en la producción de los cultivos (Larqué y Trejo, 1990; Núñez, 1991) por ser determinante en el rendimiento y producción de materia seca (Newton et al., 1996) por tanto, puede ser un factor restrictivo del crecimiento y productividad de las plantas (Salisbury y Ross, 1992).

4.2.1. Potencial hídrico (Ψ) y sus componentes

Desde el punto de vista energético, el potencial hídrico es el trabajo que habría que suministrar a una unidad de masa de agua “ligada” al suelo o a los tejidos de la planta, para llevarla de este estado de unión a un estado de referencia correspondiente al del agua pura a menudo denominada “agua libre“, por oposición a la “ligada”, a la misma temperatura y presión atmosférica. Como se adopta el valor cero para este potencial de referencia, todos los potenciales hídricos que caracterizan “el agua ligada” son negativos, indicando que sería necesario suministrar energía para llevar esta agua a un potencial hídrico igual a cero (Sánchez y Aguirreola,1996).

El potencial (Ψ) también se utiliza para expresar el estado energético del agua en células y tejidos vegetales, y consta de cuatro componentes:

$$\Psi = \Psi_t + \Psi_s + \Psi_m + \Psi_g$$

en donde: $\Psi_t + \Psi_s + \Psi_m + \Psi_g$, representan a los potenciales de turgencia, de solutos, mátrico y gravitacional respectivamente, en una célula o tejido vegetal.

La vacuola, que llega a ocupar entre el 80 y el 90 % del volumen total de la célula, se halla rodeada por el tonoplasto, que es una membrana semipermeable. Se considera, por tanto, que los intercambios de agua celular están controlados por la vacuola, y que la célula parenquimática madura se comporta como un osmómetro. En tal situación el Ψ_m junto con el Ψ_s constituyen el denominado Ψ_π (potencial osmótico)

$$\Psi = \Psi_t + \Psi_\pi + \Psi_g.$$

Potencial osmótico: El potencial osmótico, está determinado por la concentración de sustancias osmóticamente activas en la vacuola, y es idéntico a la presión osmótica de la savia vacuolar. En una célula vegetal, el potencial osmótico posee valores negativos que varían con el volumen celular; es más próximo a cero en células totalmente hidratadas.

Potencial de turgencia: Al entrar el agua en la célula, ejerce una presión sobre las paredes celulares, denominada presión de turgencia o potencial de turgencia (Ψ_t); dicho potencial adquiere valores positivos siempre que el agua en la célula ejerza una presión sobre las paredes circundantes. A medida que se pierde el agua de la célula, la célula se

contrae progresivamente con una caída concomitante en la turgencia celular y el potencial de turgencia se hace cero en una etapa denominada plasmólisis incipiente (Sánchez y Aguirreola,1996).

4.3. Métodos Dieléctricos del Contenido de Agua en el Suelo

Un dieléctrico es una sustancia (o material) no conductora de la electricidad, pero que cuando se sitúa entre dos superficies cargadas (de un condensador) no permite un flujo neto de carga eléctrica sino un desplazamiento de la carga (Hillel, 1998).

La constante dieléctrica del suelo es una medida de la capacidad de transmitir ondas o pulsos electromagnéticos y está influenciada por el volumen de agua, ya que el agua, a las frecuencias de la radio (Topp, 1993), tiene un valor dieléctrico de 80, mucho mayor que la de los minerales de suelo (entre 4 y 5), la materia orgánica (4) y el aire (1).

Se consideran básicamente dos categorías de sensores (Azam-Ali y Mwale, 2003; Charlesworth, 2000, citados por De Santa et al, 2005): los sensores TDR (Time Domain Reflectometry) y los sensores FDR (Frequency Domain Reflectometry), también denominados de capacitancia.

La técnica del TDR, Reflectometría en el Dominio del Tiempo (Time Domain Reflectometry), se utiliza para medir el contenido volumétrico de agua en los suelos (θ_v). El método se basa en la relación entre la constante dieléctrica aparente del suelo (K_a) que mide el TDR y el contenido volumétrico del agua en el suelo (θ_v).

El TDR mide el tiempo que tarda un pulso electromagnético en viajar a través de unos electrodos de metal colocados en el suelo. Como el tiempo de viaje es función de la constante dieléctrica, es posible obtener relaciones lineales entre el citado tiempo y el contenido de agua en el suelo. Los electrodos de metal se pueden instalar de forma vertical u horizontal, pero siempre deben tener un buen contacto con el suelo (Campbell y Mulla, 1990, citados por De Santa et al, 2005). El volumen de suelo explorado por una sonda TDR se aproxima a un cilindro alrededor de las guías metálicas con un diámetro de 1.5 veces la separación entre guías.

Topp et al., (1980) desarrollaron una expresión empírica, que se conoce como ecuación de Topp, que relaciona la constante dieléctrica aparente del suelo (K_a) que mide el TDR y el contenido volumétrico de agua en el suelo (θ_v).

$$\theta_v = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.92 \cdot 10^{-2} K_a - 5.5 \cdot 10^{-4} K_a^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} K_a^3$$

En determinados tipos de suelo se recomienda establecer curvas de calibración. La influencia de algunas propiedades físicas de los suelos(textura, densidad aparente y contenido en hierro) en las propiedades dieléctricas son todavía objeto de estudio (Heatman et al., 2003, citado por De Santa et al, 2005).

4.4. Déficit y Estrés Hídrico

El déficit hídrico se produce cuando la pérdida de agua por transpiración es mayor que su absorción por las raíces. Esto puede producir efectos negativos sobre una serie de funciones fisiológicas de la planta como la fotosíntesis y respiración (Martín y Valero, 1993).

4.4.1. Respuestas generales de las plantas al estrés hídrico

Cuando una planta está sometida a unas condiciones significativamente diferentes de las óptimas para la vida se dice que está sometida a *estrés*, si bien las diferentes especies o variedades difieren en sus requerimientos óptimos y por tanto en su susceptibilidad a un determinado estrés (Hsiao 1973, Levitt 1980). Además, hay períodos o etapas del desarrollo, como el estadio de plántula, donde las especies pueden ser particularmente sensibles (o insensibles) a un estrés determinado. El conocimiento de los mecanismos de resistencia al estrés permiten comprender los procesos evolutivos implicados en la adaptación de las plantas a un ambiente adverso. En sistemas biológicos se ha adoptado el concepto físico de tensión-deformación (*stress-strain*) para analizar los procesos que ocurren cuando una planta se encuentra sometida a una situación de estrés. El estrés biológico sería cualquier factor ambiental capaz de producir una deformación (*strain*) potencialmente nociva en un organismo (Levitt 1980). La deformación o *strain* sería la extensión o compresión -respuesta al estrés- resultante de una tensión o *estrés* determinado al que está sometido una planta. Evidentemente, esto se trata de una analogía, ya que en sistemas biológicos no se producirá una extensión o compresión, sino una respuesta del organismo a escala funcional que intentará minimizar el efecto del estrés. La respuesta del organismo puede ser una deformación o cambio físico (e.g. rotura de membranas celulares, flujo citoplasmático, etc.) o una deformación química (e.g. cambios en la síntesis de metabolitos). Por lo tanto, la resistencia al estrés en una planta se podría definir como la tensión necesaria para producir una determinada deformación, y un valor que se suele utilizar como medida de resistencia al estrés es el DL₅₀, o el punto donde se produce la muerte del 50% de los individuos (Levitt 1980).

4.4.2. Estrategias frente al estrés hídrico

La disponibilidad hídrica está considerada como el principal factor que afecta la actividad de las plantas en ecosistemas mediterráneos (Di Castri *et al.* 1981, Blondel y Aronson, 1999). Esta falta de agua o déficit hídrico sería la tensión o estrés que actuaría sobre las plantas, y toda tensión produce dos tipos de respuesta en los organismos: respuestas que tienden a evitar o prevenir la tensión (mecanismos evitadores) y mecanismos o adaptaciones que permiten soportar o resistir el estrés (mecanismos tolerantes). En las plantas, las respuestas o mecanismos para afrontar esta situación, han sido denominados estrategias, y son características de cada especie (Larcher 1995). Diversos autores han realizado clasificaciones más o menos extensas en las cuales se definen las principales estrategias de las especies que pueden denominarse en general mecanismos de resistencia. Estas clasificaciones, aunque utilizan diferentes nomenclaturas, se refieren a mecanismos similares. En 1980, Levitt describió extensamente los dos tipos de estrategias de resistencia al déficit hídrico: la *estrategia evitadora de la sequía* y la *tolerante de la sequía*. Las especies evitadoras de la sequía serían especies homeohídricas (comportamiento hídrico estable) o bien “reguladoras” en el sentido de Hickman (1970), ya que regulando la transpiración evitarían tensiones excesivas en el xilema, mientras que las especies tolerantes serían “conformistas” según este mismo autor. Otro tipo de estrategia, no considerado por muchos autores como de auténtica resistencia al déficit hídrico, es la *estrategia elusiva o de escape* de la sequía, que es aquella donde las plantas completan su ciclo vital antes de la llegada del estrés hídrico y, por lo tanto, el período desfavorable lo pasan en forma de semilla. No obstante, dentro de esta estrategia de escape cabe incluir especies que entran en una dormancia vegetativa parcial durante el período de sequía, como las jaras (malacófilos xerofíticos deciduos o semideciduos de verano) o las gramíneas rizomatosas (e.g. *Stipa*, *Lygeum*, *Brachypodium*). En las otras dos estrategias, las plantas soportan el período desfavorable en estadio vegetativo activo. Las especies con estrategia tolerante serían para Levitt las plantas que toleran que el estrés llegue a afectar en sus tejidos. Estas especies tienen mecanismos que minimizan o eliminan la deformación (*strain*) que pueden sufrir como consecuencia del estrés, alcanzando un equilibrio termodinámico con el estrés sin sufrir daños. Los mecanismos de tolerancia son muy específicos de la deformación que se produzca, desencadenándose diferentes modos de resistencia e incluso llegando a ser toleradas las deformaciones plásticas. Un aspecto importante de esta estrategia son los mecanismos reparadores de ese estrés, que la planta

tiene que poner en funcionamiento cuando éste ha dejado de actuar (Levitt 1980). En la estrategia evitadora del estrés hídrico las plantas previenen o minimizan el estrés en sus tejidos, ya que éstos son muy sensibles a la deshidratación. Las especies que siguen esta estrategia o bien maximizan la absorción de agua (e.g. sistemas radicales profundos) o bien minimizan las pérdidas de agua (cierre de estomas rápido y sensible a ligeros descensos del contenido hídrico de los tejidos o al potencial hídrico, valores en general bajos de conductancia estomática, paredes celulares poco elásticas que inducen cambios rápidos de potencial hídrico en respuesta a pequeñas pérdidas de agua, hojas pequeñas, bajas tasas de transpiración), por lo que dentro de esta estrategia se encuentran dos mecanismos evitadores: uno por derroche de agua, el cual permite mantener hidratados los tejidos en plena sequía siempre que el acceso al agua del suelo y su distribución interna por el xilema no sea limitante, y otro por ahorro de agua. Ambos mecanismos mantienen a las plantas dentro del estado de turgor, con potenciales hídricos relativamente altos. Cuando las condiciones de déficit hídrico se acentúan, los derrochadores no pueden mantener las elevadas tasas de transpiración, y o bien se vuelven ahorradores o bien el individuo muere (Levitt 1980, Kozłowski *et al.* 1991). Levitt (1980), menciona que las plantas han evolucionado hacia el desarrollo de mecanismos que evitan el déficit hídrico, mientras que los mecanismos tolerantes serían un factor que complementarían a los mecanismos anteriores. De esta forma, el desarrollo de mecanismos evitadores eficientes permitiría no solo sobrevivir al estrés sino continuar creciendo y desarrollándose en condiciones de agua limitante. Los mecanismos para evitar el estrés serían más exitosos que los tolerantes en climas áridos ya que evitarían cualquier tipo de deformación (“strain”) elástica o inelástica y los costos energéticos asociados. Sin embargo, dado que una planta no es perfectamente impermeable a las pérdidas de agua, necesita mecanismos que le permitan tolerar un cierto déficit hídrico en sus tejidos. No obstante, y aunque las plantas deben desarrollar ambas estrategias, cada especie vegetal tiende a desarrollar principalmente una de las dos estrategias (Valladares, 2004).

4.4.2.1. Resistencia al déficit hídrico

No todos los cultivos se ven afectados en la misma medida por un déficit hídrico. La resistencia al déficit hídrico puede variar de cultivo a cultivo de acuerdo a sus características genéticas, como también a algunas especializaciones en sus hojas o características de su sistema radicular.

Por otra parte, no todas las etapas fenológicas, estados de desarrollo del cultivo, tienen la misma sensibilidad al déficit hídrico. En general, los periodos más sensibles o críticos, son la floración y el crecimiento del fruto, en cambio los más resistentes son el crecimiento vegetativo y la maduración.

[\(\[//www.dfpd.edu.uy/G/BIO/BOT/Fisiolog%ADa.pdf\]\(http://www.dfpd.edu.uy/G/BIO/BOT/Fisiolog%ADa.pdf\).\)](http://www.dfpd.edu.uy/G/BIO/BOT/Fisiolog%ADa.pdf)

4.4.2.2. Respuestas fisiológicas del cultivo al déficit hídrico

La disminución de la humedad del aire y del suelo pueden afectar a la hoja al producir cambios estomáticos, lo que tiene un efecto en la conductancia estomática, transpiración y fotosíntesis.

4.4.2.2.1. Estomas:

Según Esau (1976), los estomas son poros en la epidermis de la planta, rodeados por dos células oclusivas. Éstos son los responsables del intercambio gaseoso en las hojas y además, del control hídrico de la planta. Tanto la frecuencia como el tamaño pueden variar en función de la posición foliar y condiciones de crecimiento. Los movimientos estomáticos dependen de cambios en la presión de turgencia en el interior, tanto de las células oclusivas como de las células epidérmicas adyacentes (Sánchez y Aguirreola, 1996).

Cuando las plantas experimentan condiciones ambientales adversas como sequía, los estomas se cierran para reducir la pérdida de agua por las hojas y la difusión de CO₂ se altera, resultando en una concentración interna más baja y una disminución en la tasa de asimilación (Grodzinsky, 1992; Taiz y Zeiger, 1991). También el CO₂ tiene un marcado efecto sobre los estomas, cuyas bajas concentraciones los cierran. A altas concentraciones de CO₂ la luz puede inducir apertura estomática (Cui y Nobel, 1994; Nobel et al., 1994).

4.4.2.2.2. Transpiración:

La transpiración es la pérdida de agua en forma de vapor por los vegetales, principalmente a través de los estomas donde ocurre de 80 a 90 % de la transpiración (Torres, 1995). La evaporación del agua en las hojas consume la mayor parte del gradiente de energía necesaria para el movimiento del agua. El valor tan negativo del potencial hídrico en la atmósfera, en comparación con los valores del potencial hídrico encontrados

normalmente en los tejidos vegetales, indica que el mayor gradiente de potencial hídrico en todo el sistema se presenta en el segmento hoja- aire.

Los factores ambientales más importantes que afectan la transpiración son: radiación, déficit de presión de vapor del aire, temperatura, velocidad del viento y suministro de agua. Entre los factores de la propia planta figuran: área foliar, estructura y exposición foliar, resistencia estomática y capacidad de absorción del sistema radical (Sánchez y Aguirreola, 1996). Otro factor que afecta fuertemente la transpiración es la capa frontera que rodea a la hoja. En general, la transpiración disminuye cuando aumenta la resistencia de la hoja, el cierre de los estomas y la temperatura (Larqué y Trejo, 1990).

4.4.2.2.3. Conductancia estomática:

La conductancia estomática, indica el grado de apertura de los estomas (Salisbury y Ross, 1992). Si un porcentaje de los estomas están cerrados, la conductancia se reduce en esa proporción (André y Du Cloux, 1993). Por tanto, al reducir la apertura estomática se reduce la pérdida de agua, y de esta manera las plantas utilizan menos agua para crecer (Bazzaz y Fajer, 1992). La conductancia del flujo de vapor de agua, CO₂ y O₂ a través de los estomas es inversamente proporcional a la resistencia que presentan las hojas a este flujo. El nivel de conductancia estomática está dada por el balance de la turgencia entre las células guarda y las subsidiarias de los estomas (Ludlow y Muchow, 1990).

La conductancia estomática se reduce en forma considerable cuando existe déficit de humedad, lo cual provoca pérdidas de rendimiento, pero evita la deshidratación de la planta. Este mecanismo es una estrategia de sobrevivencia, a costa de perder eficiencia en el uso del agua (Ludlow y Muchow, 1990; Ritchie et al., 1990; Webb y Mansfield, 1992).

4.4.2.2.4. Fotosíntesis:

La fotosíntesis es la absorción de energía lumínica y su conversión en energía química estable por la síntesis de compuestos orgánicos. Según Bidwell (1990), puede considerarse como un proceso de tres fases:

- La absorción de la luz y retención de energía luminosa.
- La conversión de energía luminosa en energía química.
- La estabilización y almacenaje de la energía química.

La falta de agua afecta la actividad metabólica de las plantas y de las partes vivas de la célula (protoplasma) y es importante en la reacción fotosintética (Castonguay y Markhart, 1991; Kumar et al., 1994). Cuando la humedad en el suelo es alta, la tasa fotosintética óptima se alcanza con baja irradiación. En cambio, un severo estrés de humedad disminuye la fotosíntesis, probablemente porque la rápida evaporación reduce la turgencia de las células oclusivas y causa el cierre de los estomas (Webb y Mansfield, 1992; Kumar et al., 1994).

4.5. Eficiencia en el uso del agua

La eficiencia en el uso del agua (EUA) es un parámetro que se puede considerar a diferentes niveles. A nivel de la hoja, la EUA es la relación entre el carbono asimilado y el agua perdida por transpiración; a nivel de una comunidad o cultivo, la EUA es el total de materia seca por unidad de agua transpirada (Larcher, 1983). El enriquecimiento de CO₂ permite a las plantas mejorar la EUA y aminorar los efectos de estrés por sequía (Bowes, 1993). Para el caso de las plantas C₃, la EUA también puede ser aumentada con niveles elevados de CO₂, pues bajo estas condiciones conservan la humedad y disminuyen la fotorrespiración (Tinus, 1974). Con base en una amplia revisión bibliográfica sobre la eficiencia en el uso del agua (EUA), Sánchez (1990) concluye que ésta es muy variable dependiendo del tipo de planta, etapa fenológica en que se mide, ambiente al que se someta y hora de medición.

4.6. Temperatura Ambiental

La temperatura ambiental es el parámetro climático más utilizado en el monitoreo ambiental de un invernadero (Hannan, 1990), tal vez por la facilidad de su medición con respecto a otros factores climáticos como la radiación solar o humedad ambiental.

La temperatura del aire en un invernadero es consecuencia del balance de energía. En un invernadero cerrado sin calefacción, es siempre superior a la temperatura exterior durante el día, acusando un desfase en su evolución respecto a la radiación solar (Seeman, 1974).

La evolución de la temperatura del aire en invernadero describe una curva senoidal, en función del tiempo; cuya evolución durante el día va desfasada respecto a la radiación solar, con injerencias al igual que el aire libre, derivadas de la transpiración (Rossenberg, 1974).

La temperatura es un factor determinante en el desarrollo fenológico de los cultivos, cada especie vegetal tiene definido un rango óptimo, que oscila entre los 10 y 26 °C, por lo que el objetivo del manejo en un invernadero es mantener este rango, de tal manera que el cultivo se encuentre en óptimas condiciones por medio de un sistema de control climático que permita optimizar las necesidades energéticas (Ojeda et. al., 2004).

La planta responde de manera negativa a temperaturas fuera de su rango óptimo que afectan el desarrollo anatómico y morfológico de algunos órganos, así como algunos procesos de asimilación y transporte necesarios para un mejor rendimiento (López et. al., 2000). Si la temperatura está por abajo del límite mínimo el riesgo de enfermedades fungosas crece, se presenta el cierre de estomas y abortos florales. Análogamente, si la temperatura excede el límite máximo se incrementa la transpiración y con ello el riesgo de deshidratación, entre otros problemas fisiológicos como el deficiente cuajado de frutos.

4.6.1. Temperatura de las hojas

Las temperaturas de las hojas vienen determinadas por su equilibrio energético y particularmente por la intensidad de la radiación incidente y los factores de la cubierta vegetal que determinan su distribución, tales como la frondosidad, el albedo, la disposición del follaje y transmisividad de las hojas; la temperatura del aire sobre el cultivo; la intensidad de la transpiración y la velocidad del viento (Romo y Arteaga, 1989).

Norero(1977), proporciona una formula para estimar la temperatura de las hojas en función de de la intensidad de la transpiración y la velocidad del viento y Da Mota (1978) consigna las experiencias de Linacre (1964), en las que dedujo que cuando la temperatura del aire es de más de 35 °C hay un límite máximo general de unos 33 °C para la temperatura de las hojas, pero cuando las hojas padecen los efectos de una escasez de agua, las temperaturas de las mismas, pueden ser bastante superiores a los 35 °C (Romo y Arteaga 1989)

La temperatura del aire que rodea a las hojas en las cubiertas vegetales, depende esencialmente de la diferencia de temperatura entre aquellas y el aire sobre las plantas, así como del régimen del viento.

Dentro de la cubierta vegetal se presenta un perfil térmico que refleja la distribución de la temperatura a distintos niveles de la cubierta, dicha distribución es afectada por los mismos factores que determinan la temperatura de las hojas y especialmente por la estructura y densidad de la cubierta vegetal, que determina la penetración de la energía radiante. Robertson (1973), mencionado por Da Mota (1978), estableció una ecuación preliminar para la temperatura media de un cultivo, en función de la temperatura del aire, la radiación y la velocidad del viento (Romo y Arteaga 1989).

4.6.2. Temperatura del dosel

La variabilidad de la temperatura del dosel (CTV) fue definida por Clauson and Blad (1982), citados por Moran (2000), como el rango (máximo-mínimo) de todas las temperaturas infrarrojas IRT del dosel medidas dentro de una parcela durante un periodo de medición particular. Ellos encontraron que la diferencia de temperatura entre una parcela con estrés de agua y una bien abastecida de agua se incrementó, mas allá del cual los valores de CTV se estabilizaron. Ellos postularon que el comienzo del estrés de la planta podría ser señalado cuando los valores de CTV excedieron 0.7°C .

En 1982, Geiser et al., relacionó la diferencia de la temperatura del aire del dosel con la radiación neta y los datos de presión de vapor para usarlas como una herramienta de programación de riego.

En 1981 Blad et al., estudió y probó la desviación de la temperatura del dosel medida a medio día como una herramienta de control del riego. Ellos establecieron a detalle el riego para el cultivo de maíz. Con desviaciones estandar de 0.3°C en parcelas de maíz completamente irrigados. Las desviaciones mayores estuvieron en alrededor de 4.2°C en parcelas no irrigadas. En este trabajo ellos concluyen para parcelas de prueba que desviaciones estandar por encima o por debajo de 0.3°C , necesitan irrigación. En 1981 Gardner et al., sugiere que la temperatura del aire de la cubierta vegetal puede variar con el ambiente vegetal del cultivo y suelos específicos, porque el estatus hídrico de la planta puede estar determinado por el potencial de agua de la planta. Se compararon las mediciones de dichas plantas con los datos de temperatura de la cubierta vegetal. Dependiendo del tamaño de la planta y de la especie, pueden ser medidas partes de la planta o la planta completa, porque de la cubierta vegetal completa pueden esperarse variaciones considerables. Mediciones del potencial hídrico de la planta se toman

simultáneamente con la temperatura de la cubierta vegetal usando termómetros de infrarrojo. Datos recibidos de seis diferentes mediciones de terrenos irrigados variaron en la dispersión de los datos. De estos datos se concluye que la temperatura de la cubierta vegetal y el potencial hídrico de la planta están correlacionados, pero no de forma lineal. Su conclusión fue que la cuantificación de la medida del estrés hídrico de la planta en condiciones de campo aún no se ha logrado.

También las temperaturas de la cubierta vegetal pueden afectarse dramáticamente con cambios en las condiciones de nubosidad incrementando la variabilidad de los datos. Cambios en la temperatura de la hoja arriba de 6°C se han reportado causadas por cambios en la insolación solar. Un sombreo causado por las nubosidades, para una hoja requiere de 30-45 segundos para alcanzar un nuevo equilibrio (Wiegand and Namken, 1966).

4.7. Termometría Infrarroja

El único método para medición de la temperatura sin hacer contacto es mediante el termómetro de infrarrojo, que se basa en el principio de que todas las superficies emiten energía. El flujo de radiación sigue la ley de Stefan Boltzmann, es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del objeto. Como la temperatura de la vegetación es de alrededor de 290 °K, emite radiación de onda larga con un pico de emisión alrededor de 10 μm . Típicamente, los termómetros infrarrojos están provistos de filtros que dejan pasar al detector solo radiación en la gama de 8 a 13 μm .

Son costosos, difíciles de calibrar y expuestos a error si se detecta radiación de onda larga reflejada. Cuando se usan correctamente, los errores están entre 0.1 y 0.5 °C. Intrínsecamente son preferibles a los métodos de contacto porque estos últimos pueden alterar la temperatura de la superficie mediante la medición por conducción simultánea entre el termómetro, la superficie y el aire, lo que genera posiblemente errores más grandes (Coombs et al., 1988).

La Radiación Infrarroja, es exactamente igual que cualquier rayo de luz, es una radiación electromagnética de baja frecuencia y una longitud de onda larga. La región infrarroja del espectro incluye la radiación con número de onda comprendidas entre 12800 y 10 cm^{-1} lo que corresponde a longitudes de onda de 0.78 a 1000 μm (micrómetro), divididas en tres regiones denominadas: infrarrojo cercano, medio y lejano. La gran mayoría de las aplicaciones analíticas se han restringido al uso de una parte del infrarrojo

medio comprendida entre los 4000 y los 400 cm^{-1} de 2.5 a 25 μm (www.zytemp.com.mx/teoria.php).

La espectroscopia infrarroja tiene una gran aplicación en el análisis cualitativo y cuantitativo, siendo su principal utilización la identificación de compuestos orgánicos, que por lo general presentan espectros complejos en el IR medio con numerosos máximos y mínimos que resultan útiles al efectuar comparaciones con espectros de referencia, en numerosos casos el espectro infrarrojo medio de un compuesto orgánico proporciona un espectro único, con unas características que se distinguen fácilmente del resto de los compuestos, solo los isómeros ópticos absorben exactamente de la misma forma. Además de su aplicación como herramienta para el análisis cualitativo, las medidas en el infrarrojo también están encontrando un uso cada vez mayor en el análisis cuantitativo. En este caso, su elevada precisión hace posible la cuantificación de una sustancia en una mezcla compleja, no siendo necesaria una separación previa.

([www2.uah.es/cemaeta/radiación% 20 infrarroja.htm](http://www2.uah.es/cemaeta/radiación%20infrarroja.htm)).

4.7.1. Termómetros de infrarrojo en agricultura.

Durante los años de 1960, los termómetros de infrarrojo se hicieron comercialmente disponibles como una tecnología avanzada. El primer instrumento estaba constituido de un sensor de cabeza con peso ligero conectado a una consola electrónica mediante un cable. Estos instrumentos requerían de una fuente de poder externa. El sensor original contenía una cabeza para controlar la temperatura de cuerpo negro de alrededor de 40°C . En los meses de verano, la temperatura ambiente del aire fue alta y la cabeza del sensor fue expuesta a la radiación solar. La temperatura de referencia de 40°C fue excedida, causando errores en las lecturas de temperatura. Posteriormente el sensor infrarrojo se diseñó para ser portátil el cual incluía una consola operada por baterías.

Muchos de estos instrumentos fueron hechos para usarse en distintas áreas con ligeros cambios de temperatura. Algunos de estos instrumentos fallaron en el campo debido a la temperatura del aire. Fue entonces cuando varias compañías comenzaron a considerar este problema y se hizo un significativo progreso hacia la solución. Finalmente varios circuitos de compensación de temperatura se sumaron como parte integral del instrumento el cual es usado actualmente para muchas actividades (Everest, 1982)

La medición de la temperatura de la superficie es un componente indispensable para la transferencia de energía. La medición exacta del gradiente de temperatura entre la planta y el aire es esencial para la determinación de la tasa de transpiración y la conductancia estomática tanto en hojas simples como en doseles de plantas. Este gradiente es frecuentemente menor de 3 °C, lo cual significa que la temperatura de la hoja debe ser medida con una precisión de hasta 0.12 °C, con sistemas que corrigen la lectura por cambios en la temperatura del sensor (LAROUSSE, 1987).

En 1972, Aston y Van Bavel proponen la medición de la radiación visible y de la carga de calor radiante térmica sobre las hojas de las plantas, así como la reducción del agua, detectando remotamente la superficie del suelo seco. Ellos sugirieron varias ubicaciones en el campo donde se presentan situaciones de estrés unos antes que otros debido a la inherente heterogeneidad del suelo. Ellos sugirieron la ubicación en el campo donde el dosel es estresado por temperatura con mayor variabilidad que las áreas donde existen buenas condiciones de humedad. Ellos propusieron que esta variabilidad puede ser usada para indicar el comienzo del déficit hídrico.

En 1974 Stone y Horton instalaron un termómetro de infrarrojo sobre un campo de sorgo, ellos midieron tanto la temperatura del dosel como la temperatura del aire para evaluar la evapotranspiración (ET). Ellos usaron este método para obtener la estimación regional de la (ET). Blad y Rosenberg (1976), montaron un instrumento sobre un cultivo de alfalfa y compararon los resultados midiendo la temperatura de superficie con termocoples y el escaner de aeronave.

Mediante el desarrollo de los termómetros de infrarrojo, la investigación se movió desde el estudio de hojas individuales hasta la investigación de doseles completos de cultivo. La conclusión que emergió desde los primeros estudios teóricos de la temperatura de la hoja y el dosel, fue que la radiación el mayor modo de transferencia de calor de las hojas individuales, pero para el dosel como un todo, la transpiración fue el mecanismo dominante (Idso y Baker 1967, citado por Morán, 2000). Entonces, para un dosel, el enfriamiento transpiracional jugó el mayor rol en la determinación de la temperatura de la planta. Esta conclusión soportó el concepto de que las mediciones de temperatura infrarroja podrían ser útiles para actividades de manejo a la escala de dosel, tales como programación del riego, entre otras actividades (Morán 2000).

4.8. Índices de Estrés Hídrico de Cultivos

4.8.1. Generalidades

La calidad espectral de la luz reflejada desde las hojas, manifestada en el color de la hoja, ha sido desde hace mucho tiempo considerada como un indicador de estrés de la planta. Sin embargo, las características espectrales de la radiación reflejada, transmitida, o absorbida por las hojas requiere un completo entendimiento de las respuestas fisiológicas a las condiciones de crecimiento y las adaptaciones de la planta al medio ambiente. En los siglos pasados XIX y XX, los avances tecnológicos empezaron a permitir el análisis de cambios en el espectro de la hoja que ocurren con el estrés (Sorby, 1973; Coblenz, 1912; Shull, 1929, citados por Carter, 2001). La investigación de tales características espectrales fue intensificada grandemente a partir de los años sesenta, paralelamente con el desarrollo de la instrumentación y el interés en el potencial del sensado remoto para la detección del estrés.

Se ha indicado ampliamente que las alteraciones de reflectancia en el espectro visible por las condiciones de estrés resulta de la sensibilidad de las concentraciones de clorofila de la hoja a la disturbancia metabólica (Knippling, 1970, citado por Carter, 2001).

Muchos estudios han vinculado las respuestas en la reflectancia, transmitancia o absorbancia espectral en las hojas al estrés fisiológico. Una variedad de factores estresantes incluyendo la deshidratación, inundación, congelamiento, ozono, herbicidas, enfermedades, deficiencias en desarrollo ectomicorrizico y fertilización nitrogenada han sido impuestos sobre un rango de especies, que van desde pastos hasta coníferas. En todos los casos, las máximas diferencias en reflectancia dentro del rango de longitudes de onda de 400-850 nm entre los estados control y estresado ocurrió como un incremento en la reflectancia en longitudes de onda cerca de 700 nm. En estudios que incluyeron la transmitancia y absorbancia, así como reflectancia, las máximas diferencias ocurrieron como un incremento y decremento, respectivamente, cerca de 700nm. La respuesta óptica al estrés cerca de 700 nm, así como los cambios correspondientes en reflectancia que ocurren en el espectro verde-amarillo, puede ser explicado por la tendencia general del estrés a reducir la concentración de clorofila en la hoja (Carter y Knapp, 2001).

Hiler y Clark (1971), citados por Morán (2000) propusieron el índice Grado de Estrés (SDI), por sus siglas en inglés. El SDI está basado sobre una medida del grado y duración del estrés de agua y por lo tanto del estrés fotosintético, así como a la susceptibilidad de la planta a un estrés de agua determinado, el SDI está definido por la siguiente expresión:

$$SDI = \sum_{i=1}^n (SD_i CS_i).$$

donde SD es el factor de día estrés, CS es el factor de susceptibilidad del cultivo y n representa el número de periodos de crecimiento (días) considerados. SD está definido por la tasa de transpiración de la planta (Γ) y la tasa de transpiración potencial (Γ_p).

Donde : $SD = 1 - \Gamma / \Gamma_p$

CS representa la susceptibilidad de un cultivo a una magnitud dada de SD y es una función de las especies y estados de crecimiento del cultivo (Hiller y Clark, 1971, citados por Morán 2000).

Los días grado estrés fue definido por Idso et al (1977) y Jackson et al. (1977) de la siguiente manera:

$$SDD = \sum_{i=1}^n (T_c - T_a)_i.$$

donde T_c es la temperatura del dosel de la planta medida 13-13.30 horas después del medio día solar (zenit), T_a es la temperatura del aire 1.5 m arriba de la superficie del suelo, y $(T_c - T_a)$ es sumada sobre n días comenzando en el día i (Idso et al., 1977, citado por Morán, 2000). Con lo anterior se mostró que en el clima árido de Phoenix, Arizona, los rendimientos de trigo fueron reducidos si el SDD se volvía positivo. Jackson et al. (1977), citado por Morán (2000), Postuló que el SDD estuvo directamente relacionado al uso del agua y podría ser usado para la programación del riego de cultivos y monitorear periodos de estrés de praderas para proveer una estimación del rendimiento. En un trabajo posterior, Jackson (1982), citado por Morán, reconoció que la división arbitraria en $SDD = 0$ no fue apropiada para todas las condiciones ambientales, particularmente regiones con alta humedad atmosférica.

En 1979, Walker y Hatfield aplicaron el concepto de SDD a las aluvias rojas. Ellos también establecieron que el rendimiento final del cultivo está relacionado inversamente con los SDD. Ellos propusieron menor disponibilidad hídrica para la transpiración, el aumento de los (SDD) prueban que la transpiración y la temperatura del dosel están relacionadas.

Yu et al. (1999), propusieron y probaron un método nuevo para la estimación de transpiración de cultivos e índices de estrés por agua en cultivos (CWSI) por el uso de una aproximación a la temperatura de la hoja: En el método propuesto, son requeridas tres temperaturas y algunas variables meteorológicas (radiación neta y humedad). Las tres temperaturas incluyen temperatura de hojas iluminadas por el sol T_c , temperatura de la imitación de hoja T_p , y temperatura del aire T_a . La imitación de la hoja se refiere a una hoja artificial sin transpiración. La mayor ventaja del método propuesto es que los factores de corrección de la planta, coeficientes empíricos y la resistencia aerodinámica y del dosel no son requeridas. Los experimentos realizados para la verificación fueron conducidos en campo en suelo arenoso con cultivo de sorgo y en invernadero con cultivo de melón. Los datos obtenidos con el método propuesto fueron comparados con la cantidad de transpiración determinada con lisímetros, con un coeficiente de regresión $r^2 = 0.88$. Los valores de CWSI calculados por el método propuesto estuvieron en concordancia con el método CWSI de Jackson, con un coeficiente de regresión aproximadamente igual a 1. Estos resultados indican que el método propuesto puede ser aplicado para estimar la transpiración de cultivos y el índice de estrés hídrico bajo condiciones de campo e invernadero.

4.8.1.1. Teoría del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI)

El agua evaporada por una superficie vegetal funciona al mismo tiempo como un estabilizador de la temperatura de las hojas ante la demanda evaporativa de la atmósfera. A partir de esto, Jackson et al., (1981) presentaron la teoría del balance energético que separa la radiación neta en calor sensible del aire y calor latente que incide en la transpiración. Cuando el cultivo se somete a estrés hídrico, los estomas se cierran, la transpiración decrece y la temperatura de la hoja aumenta. Cuando una planta transpira sin estrés hídrico, la temperatura de la hoja es entre 1- 4 °C menor que la temperatura ambiental, en este caso el CWSI es 0. Cuando la transpiración decrece, la temperatura de la hoja asciende y puede

alcanzar de 4 a 6 °C más que la temperatura del aire. En este caso, el déficit hídrico es alto, la transpiración de las hojas se ve drásticamente reducida con el incremento de la temperatura foliar, cuando la planta está muerta o no transpira durante mucho tiempo el CWSI es 1.

Nielsen (1990) utilizó diferentes umbrales de CWSI (0.2,0.3,0.4 y 0.5) en la programación del riego en el cultivo de soya (*Glycine max L. Merrill*) con riego por goteo, aplicandose láminas de riego de 180, 181, 174 y 145 mm y los rendimientos obtenidos fueron 2656, 2566, 2430 y 2189 kg ha⁻¹ respectivamente. Los rendimientos se incrementaron ligeramente cuando aumentó la lámina de riego en 25 y 51 mm adicionales, y presentó las mismas tendencias cuando se incrementó el umbral de CWSI.

Anconelli et al., (1994) encontraron en el cultivo de jitomate (*Lycopersicon esculentum Mill*), la respuesta en rendimiento de tres valores de CWSI, usados como umbrales para el momento del riego, los cuales fueron comparados con un control (sin riego). Con el riego se obtuvieron aumentos significativos en el rendimiento de frutos. Mientras que con el tratamiento sin riego se obtuvieron 35 t ha⁻¹ de fruto, los tratamientos de riegos con umbrales alcanzados de 0.6, 0.35 y 0.1 de CWSI se obtuvieron rendimientos de frutos de 51, 57 y 60 t ha⁻¹ respectivamente. No se observaron diferencias significativas en los umbrales de CWSI de 0.1 y 0.35 de índice de estrés sin que haya disminución de la producción y calidad del fruto.

Erdem et al., (2005) evaluaron diferentes valores de mural del CWSI para programar el riego en el cultivo de sandía (*Citrullus vulgaris*) producida con riego por goteo, los riegos se iniciaron cuando los valores de CWSI alcanzaron: 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1.0 (sin riego). La cantidad total aplicada de láminas de riego fueron: 342, 280, 248, 193 y 0 mm respectivamente. La evapotranspiración máxima estacional fue de 412 mm, medida a partir del tratamiento de 0.2 de CWSI. Concluyeron que los niveles de láminas de riego afectaron significativamente el rendimiento de frutos y la producción más alta (76.3 t ha⁻¹) fue obtenida con el tratamiento de 0.2 de CWSI, los tratamientos 0.4 y 0.6 de CWSI fueron estadísticamente iguales comparado con el tratamiento de 0.2. La eficiencia máxima del uso del agua y la eficiencia del uso del agua de riego se obtuvieron a partir del tratamiento 0.6 de CWSI con 22.1 y 13.3 kg m⁻³, respectivamente. Con base en estos resultados, el valor de 0.6 de CWSI puede utilizarse en la programación del riego en el cultivo de sandía.

Simsek et al., (2005) realizaron estudios para determinar los efectos de diferentes láminas de riego por goteo en el rendimiento del cultivo de pepino (*Cucumis sativus L.*) y sus componentes, y para determinar un valor de umbral del CWSI basado en la programación del riego. Aplicaron cuatro tratamientos de riego: 50(T-50), 75(T-75), 100(T-100) y 125(T-125) de láminas de riego basado en la evaporación del tanque “A” acumulada cada tercer día. Los valores de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) fueron 633, 740, 815 y 903 mm en el primer año y 679, 777, 875 y 990 mm en el segundo año para T-50, T-75, T-100 y T-125, respectivamente. La producción comercial máxima del fruto se obtuvo con el tratamiento T-100 con 76.65 t ha⁻¹ en 2002 y 68.13 t ha⁻¹ en 2003. La producción de frutos se redujo notablemente cuando disminuyó la lámina de riego. La eficiencia del uso del agua varió de 7.37 a 9.40 kg m⁻³ y 6.32 a 7.79 kg m⁻³ en 2002 y 2003, respectivamente, mientras que las eficiencias del uso del agua del riego estuvieron entre 7.02 y 9.93 kg m⁻³ en 2002 y entre 6.11 y 8.82 kg m⁻³ en 2003. Cuando disminuyó la lámina de riego, la tasa de transpiración del cultivo disminuyó dando por resultado aumentos de temperaturas del dosel del cultivo y del CWSI, esto resultó en una disminución en el rendimiento. Un CWSI igual a 0.2 se considera como el valor umbral para el inicio del riego en el cultivo de pepino producido a campo abierto en condiciones semiáridas.

4.9. Generalidades del Cultivo de Jitomate

El jitomate es una planta perteneciente a la familia de las solanaceas, denominada taxonómicamente *Lycopersicon esculentum Mill.* El jitomate es una planta arbustiva de comportamiento perenne en climas benignos, y por ser muy sensible a las heladas se cultiva como anual en la mayoría de los países, según la variedad (Chamarro, 1995; Rodríguez *et al.*, 1997).

El cultivo de jitomate se divide en dos tipos; de crecimiento determinado y de crecimiento indeterminado. Los cultivares determinados son utilizados antes que los indeterminados, debido al tiempo aproximado de madurez que va de 50 a 60 días, por lo que se cultivan a cielo abierto y son muy convenientes para cultivarse en estaciones cálidas y cortas. Los cultivos indeterminados se usan en periodos largos de producción, ya que su tiempo de madurez es mayor que los determinados (85 a 95 días), una planta de este tipo puede producir frutos constantemente por un largo periodo de tiempo (hasta un año y

alcanzar una altura de 10 a 11 m) si se mantienen adecuadamente algunos factores como luz, temperatura, nutrición, etc. (Chamarro, 1995; Jones, 1999).

4.9.1. Características botánicas

El sistema radical de la planta presenta una raíz principal, pivotante que crece unos 3 cm al día hasta que alcanza los 60 cm de profundidad, simultáneamente se producen raíces adventicias y ramificaciones que pueden llegar a formar una masa densa y de cierto volumen. Sin embargo, este sistema radical, que es el que surge cuando la planta se origina de una semilla en siembra directa, puede ser modificado por las prácticas culturales, y así cuando la planta procede de un transplante, la raíz pivotante desaparece siendo mucho más importante el desarrollo horizontal. El tallo es erguido durante los primeros estadios de desarrollo, pero pronto se dobla a consecuencia del peso. Puede llegar hasta los 2.5 m de longitud. Su superficie es angulosa, provista de pelos agudos y glándulas que desprenden un líquido de aroma muy característico. En sección presenta una epidermis provista de estomas, una corteza formada por parénquima y tejido de sostén en forma de anillo continuo, un límite impreciso entre la corteza y el cilindro central; y los tejidos conductores dispuestos en un círculo de haces liberoleñosos (Rodríguez *et al.*, 1997).

Las hojas del jitomate son pinnado compuestas. Una hoja típica de las plantas cultivadas tiene unos 0.5 m de largo, se insertan sobre los diversos nudos, en forma alterna. El limbo se encuentra fraccionado en siete, nueve y hasta once folíolos (Nuez, 1995).

Las flores se presentan formando inflorescencias que pueden ser de cuatro tipos: racimo simple, cima unípara, cima bípara y cima múltipara; pudiendo llegar a tener hasta 50 flores por inflorescencia, las variedades modernas de jitomate muestran regularmente más de cinco pétalos amarillos y sépalos verdes; cuando las inflorescencias se producen alternando con cada hoja o dos hojas se dice que la planta es de crecimiento determinado; si la alternancia es más espaciada la planta se dice de crecimiento indeterminado. Normalmente, en las primeras predomina la precocidad y porte bajo y las segundas son más tardías y de porte alto (Jones Jr. 1999).

El fruto es una baya de color amarillento, rosado o rojo debido a la presencia de licopeno y carotina, en distintas y variables proporciones (Rodríguez *et al.*, 1997).

Por otro lado, Jones (1999) menciona que el color rosado se debe a un gen en singular (Y) que previene la formación de pigmentos amarillos en la epidermis del fruto. La forma del fruto puede ser redondeada, achatada o en forma de pera, y su superficie lisa o asurcada, siendo el tamaño muy variable según las variedades.

4.9.2. Requerimientos climáticos

El jitomate es una planta que se adapta bien a una gran variedad de climas, con la sola excepción de aquellos en que se presentan heladas. Según Pérez y Castro (1999), el jitomate requiere de una oscilación máxima de la temperatura entre el día y la noche de 8 °C, debido a que es una planta termo-periódica diaria, y la temperatura óptima oscila entre 22 y 24 °C. De acuerdo con Rodríguez *et al.*(1997), la temperatura entre día y noche debe oscilar entre 7 y 9 °C, su desarrollo vegetativo requiere de un periodo libre de heladas de al menos 110 días y una temperatura de 22 a 23 °C. Los vientos fuertes dañan considerablemente a la planta, reduciendo las producciones y, si son secos o calientes, producen la abscisión de las flores. Pérez y Castro (1999) y Rodríguez *et al.* (1997), mencionan que la temperatura mínima no debe ser menor de 12 °C, ya que se paraliza el desarrollo vegetativo y a menos de 10 °C ya no crece. La temperatura mayor no debe exceder los 35 °C, ya que se deshidratan los granos de polen y se tiene una mala fecundación, peor aún; si la humedad relativa es menor de 40 % se tendrá un crecimiento mínimo o nulo (Pérez y Castro, 1999).

4.9.3. Producción en invernadero

La necesidad de incrementar la producción agrícola en México en pequeñas superficies, con alta variación de climas, agua, heladas y limitaciones de fertilidad de suelos, las cuales se acentúan por lo accidentado de la topografía, salinidad y erosión obliga a considerar la opción de utilizar sistemas de producción intensivos que disminuyan en buen porcentaje los riesgos como la hidroponía y los invernaderos (Sánchez y Ponce, 1998; Lara, 1999). La producción en invernadero tiene como propósito propiciar y mantener un ambiente en el cual se exprese la óptima o máxima producción del cultivo (Aldrich y Bartok Jr. 1994).

En invernadero, las plantas de tomate se pueden mantener por periodos de duración de 6 a 9 meses o más. Este proceso se mantiene debido al crecimiento activo de la planta, al

cultivo libre de enfermedades y estrés. En el invernadero, esto es posible debido a que se tiene control del ambiente y otros factores que afectan el buen desarrollo de la planta, lo cual ocasiona que la planta de tomate produzca por más tiempo (Jones, 1999).

4.9.4. Nutrición de los cultivos en sus etapas fenológicas

Las etapas o fases por las cuales pasa una planta durante su desarrollo constituyen su fenología. Cada etapa fenológica tiene sus propias características fisiológicas, anatómicas y morfológicas. La transición de una etapa a otra se caracteriza por cambios en la actividad bioquímica y en la reestructuración del metabolismo primario. Estas fluctuaciones influyen en toda la planta y consecuentemente en la información analítica obtenida en cada etapa fenológica (Valenzuela *et al.*, 1993)

Después del suministro de nutrimentos minerales, la edad fisiológica de una planta o parte de ella es el factor más afectado por el contenido nutrimental que influye en la producción de materia seca (Marschner, 1995; Valenzuela *et al.*, 1993).

4.9.5. Fenología vegetal

Uno de los fenómenos naturales más evidentes es el que las plantas aumenten de tamaño en forma más o menos continua y desarrollen nuevos órganos en forma intermitente durante su vida. En la vida de un vegetal se distinguen dos grandes etapas, el crecimiento y desarrollo vegetativo, y el reproductivo. Por otro lado, es sabido que el desarrollo y las reacciones de una planta dependen de la interacción coordinada de los factores hereditarios y los ambientales sobre los procesos fisiológicos internos de dicha planta. El crecimiento y desarrollo de los vegetales, considerado como una respuesta a los factores mencionados, está sujeto al fenómeno de periodicidad. Por lo anterior, el estudio de la relación entre los factores climáticos y los fenómenos periodicos de los vegetales, es el objeto de la fenología vegetal (Romo y Arteaga. 1989).

4.9.5.1. Etapas fenológicas del tomate

La fenología del cultivo comprende las etapas que forman su ciclo de vida. En este cultivo se observan tres etapas y son:

Etapas:
Etapa Inicial: Comienza con la germinación de la semilla, se caracteriza por el rápido aumento en la materia seca, la planta invierte su energía en la síntesis de nuevos tejidos de absorción y fotosíntesis.

Etapa vegetativa: Ésta se inicia a partir de los 21 días después de la germinación y dura entre 25 y 30 días antes de la floración. Requiere de mayores cantidades de nutrientes para satisfacer las necesidades de las hojas y ramas en crecimiento y expansión.

Etapa Reproductiva: Se inicia a partir de la fructificación, dura entre 30 ó 40 días y se caracteriza porque el crecimiento de la planta se detiene y los frutos extraen los nutrientes necesarios para su crecimiento y maduración.

(//www.agronegocios.gob.sv/comoproducir/guiascenta/tomate.pdf)

4.10. Sustratos Hidropónicos

El suelo es un medio en el que tienen lugar muchas funciones de importancia para la vida de las plantas. Con frecuencia, el lugar en el que se dan condiciones limitantes que, en diferentes grados, impiden buenos resultados agronómicos. Por este motivo, en horticultura, es frecuente reemplazar el suelo natural con sustratos de origen diverso que, en alguna o en todas las fases de un cultivo, permiten superar condiciones limitantes y acercar el sistema radicular y la planta completa a una solución más cercana a la óptima para su nutrición mineral (Florian, 1997).

En horticultura, el término “sustrato”, se aplica a todo material sólido distinto del suelo natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, que colocado en un recipiente, en forma pura o en mezcla, permite el anclaje del sistema radicular y, por lo tanto, desempeña un papel de soporte para la planta (Abad, 1997).

4.10.1. Clasificación de materiales

Existen diferentes criterios de clasificación de los sustratos, basados en el origen de los materiales, su naturaleza, sus propiedades, su capacidad de degradación, etc. (Zuang y Musard, 1984; Moinereau *et al.*, 1987; Abad, 1995; Abad y Noguera, 1998).

4.10.1.1. Materiales orgánicos

- De origen natural. Se caracterizan por estar sujetos a descomposición biológica. El más empleado es la turba.
- De síntesis. Son polímeros orgánicos no biodegradables, que se obtienen mediante síntesis química (espuma de poliuretano, espuma de urea-formaldehído, poliestireno expandido, etc).
- Subproductos y residuos de diferentes actividades agrícolas, ganaderas, industriales, urbanas, etc. Muchos materiales de este grupo deberán someterse a un proceso de compostaje para su adecuación como sustratos (cascarilla de arroz, estiércoles, cortezas de árboles, serrín, virutas de madera, residuo de fibra de coco, residuo del corcho, residuos sólidos urbanos, lodos de depuración de aguas residuales, etc).

4.10.1.2 Materiales inorgánicos

- De origen natural. Se obtienen a partir de rocas o minerales de origen diverso, modificándose muchas veces de modo ligero, mediante tratamientos físicos sencillos. No son biodegradables (arena, grava, tierra volcánica, etc).
- Transformados o tratados industrialmente. A partir de rocas o minerales, mediante tratamientos físicos -y a veces también químicos- más o menos complejos, que modifican notablemente las características iniciales de los materiales de partida (arcilla expandida, lana de roca, perlita, vermiculita, etc).
- Residuos y subproductos industriales. Comprenden los materiales residuales procedentes de distintas actividades industriales (escorias de horno alto, estériles del carbón, ladrillo molido, etc). Dado que llevar a cabo una descripción de todos los materiales posibles es una tarea prácticamente inabordable, a continuación se indica únicamente la situación actual y las perspectivas de futuro de los materiales orgánicos y minerales utilizados como sustratos de cultivo en nuestro país.

Salazar (2006) menciona que la primera etapa del uso de un sustrato en hidroponía es la caracterización del mismo, con objeto de conocer sus propiedades físicas, fisicoquímicas, químicas y biológicas, por lo anterior, los sustratos se clasifican según sus propiedades y origen.

4.10.2. Materiales utilizados como componentes de sustratos

El sustrato de cultivo está constituido por un material poroso, en el que se desarrolla el sistema radicular de la planta, y del que ésta toma el agua y los nutrientes que necesita para su desarrollo y el oxígeno necesario para el funcionamiento correcto del sistema radicular. Para Michelot (1999), el soporte del cultivo (suelo o sustrato) cumple cuatro funciones:

- Asegura el anclaje mecánico de la planta
- Constituye la reserva hídrica de la que las raíces toman el agua para cubrir las necesidades de la planta
- Las raíces son órganos aerobios. El sustrato debe proporcionar el oxígeno que necesitan para su correcto funcionamiento.
- Finalmente, debe asegurar la nutrición mineral de la planta.

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 radicular 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.

Son numerosos los materiales porosos que se pueden emplear para cubrir estas necesidades. Las características de los diferentes materiales varían en intervalos muy amplios.

Esta diversidad llevó a los pioneros de los sustratos a definir el sustrato “ideal”, concibiendo como tal a un sustrato adecuado para el cultivo de cualquier planta. De Boodt definió un sustrato ideal (De Boodt y De Waele, 1968). Sin embargo, este concepto está en desuso y son varios los autores que responden negativamente a la pregunta ¿existe un sustrato ideal para el cultivo sin suelo? (Raviv *et al.* 1986; Abad, 1995; Abad y Noguera, 1998).

4.10.3. Propiedades de los sustratos

El primer paso para la utilización de un material como sustrato de cultivo es la caracterización y el estudio crítico de sus propiedades físicas, fisico-químicas, químicas y biológicas. El objetivo de este estudio es doble; por una parte, la detección de posibles factores limitantes para su utilización como sustrato, y por otra, establecer sus utilidades y limitaciones como sustrato, así como las pautas de manejo adecuadas (Abad *et al.*, 1993; Abad, 1995; Abad y Noguera, 1998). Si en el estudio de las propiedades se detecta la presencia de factores limitantes, el paso siguiente es la aplicación de los tratamientos adecuados para la superación de estas limitaciones (Abad *et al.*, 1993, Ortega *et al.*, 1998).

4.10.3.1. Propiedades físicas

Las propiedades físicas de los sustratos de cultivo son de gran importancia (Raviv *et al.*, 1986; Abad, 1995; Abad y Noguera, 1998). Esto es debido al hecho de que una vez que el sustrato está en el contenedor y la planta creciendo en él, la capacidad del usuario para intervenir en la modificación de las propiedades físicas es prácticamente nula. Esto contrasta con el *status* químico de los sustratos, que puede ser modificado mediante técnicas de cultivo apropiadas, realizadas por el propio agricultor. En función del ámbito de estudio, las propiedades físicas a estudiar son distintas. El manejo del agua de riego está estrechamente relacionado con las características del espacio poroso.

El transporte y el manejo del sustrato están condicionados por la relación peso-volumen, y por lo tanto por su densidad aparente y la cantidad de agua absorbida. Otras características a tener en cuenta son la mojabilidad y la contracción de volumen.

4.10.3.1.1. Distribución del tamaño de poro

El espacio poroso de un sustrato está constituido por los espacios huecos (poros) dejados por la fase sólida. La forma, tamaño y distribución de los poros condiciona las propiedades hídricas del sustrato, y por lo tanto el manejo del agua de riego. En ocasiones, esta fase sólida tiene una forma propia, es el caso de las fibras minerales aglomeradas con una resina (lana de roca) o el caso de las espumas sintéticas. En ellas, el espacio poroso está constituido por los poros que deja la propia estructura sólida en su interior. Lo más usual es que la fase sólida esté constituida por partículas sueltas de tamaño variable y, en general, con una estructura interna determinada. Las partículas pueden ser de forma granular (ej.: cortezas) o fibrosa (ej.: turba). La estructura propia de las partículas

granulares puede ser tal que en su interior formen estructuras celulares, que a su vez pueden estar o no comunicadas con el exterior de la partícula. Cuando las partículas son fibrosas, la posibilidad de encontrar estructuras celulares en su interior se reduce considerablemente.

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. 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 distribución del tamaño de partícula de los sustratos se expresa frecuentemente como un único parámetro: el Índice de Grosor (Richards *et al.*, 1986; Abad y Noguera, 1998). Este índice se define como el porcentaje acumulado (en peso o en volumen) de partículas con diámetro superior a 1 mm, y suele estar bien correlacionado con las características hidrofísicas del sustrato.

4.10.3.1.2. Densidad aparente

La densidad aparente se define como la masa seca del material sólido por unidad de volumen aparente del sustrato húmedo, es decir, incluyendo el espacio poroso entre las partículas (Martínez, 1992). Este parámetro juega un importante papel, ya que los sustratos se transportan durante su manejo y manipulación, y, consecuentemente, su peso ha de ser tenido en cuenta. Por otro lado, el anclaje de la planta también debe ser considerado como un factor de importancia, ya que entre más alta sea la planta, más fuerte deberá ser el sustrato. Cuando el cultivo está protegido del viento (caso de los invernaderos) y éste no supone un peligro para la estabilidad de la planta, la densidad aparente del sustrato puede ser tan baja como 0.15 g/cm^3 (Abad, 1995). Las plantas que crecen al aire libre deberían ser cultivadas en sustratos más fuertes, con densidades aparentes comprendidas entre 0.50 g/cm^3 y 0.75 g/cm^3 (Raviv *et al.*, 1986).

4.10.3.1.3. Conductividad hidráulica

La cantidad de agua que retiene un sustrato es importante, pero también lo es su capacidad para transmitirla. Esta capacidad se mide por la Conductividad Hidráulica (K). Su valor es máximo en condiciones de saturación (Conductividad Hidráulica Saturada, K_{sat}) y está estrechamente relacionado con las características del espacio poroso (forma y tamaño de los poros, tortuosidad, etc) y del tipo de superficie (hidrófoba/hidrófila) de las partículas del sustrato. En condiciones de no saturación (Conductividad Hidráulica Insaturada, K_{insat}) su valor disminuye. Es función del contenido volumétrico de agua del sustrato, incidiendo además los mismos factores que sobre K_{sat} . La determinación experimental de K_{insat} es laboriosa y compleja. Como alternativa puede estimarse mediante modelos de predicción, conociendo el valor de K_{sat} y los ajustes de la curva de liberación de agua (Mualen, 1976; Van Genuchten, 1978).

4.10.3.1.4. Mojabilidad

Algunos materiales orgánicos pueden presentar dificultades tanto para ser humedecidos inicialmente como para ser rehumectados una vez que se han secado en el contenedor, lo que puede provocar un retraso y una reducción en el crecimiento de la planta (Bunt, 1988). Las dificultades para mojar un sustrato se atribuyen generalmente a dos causas: la hidrofobicidad del material y la contracción que experimenta al secarse. La mojabilidad se expresa como el tiempo (en minutos) necesario para que una muestra de sustrato seco a 40 °C absorba 10 ml de agua destilada (AS 3743, 1993). El nivel óptimo es igual o inferior a 5 minutos (Abad *et al.*, 1996).

4.10.3.1.5. Contracción de volumen

Corresponde al porcentaje de pérdida de volumen que experimenta el sustrato cuando se seca -generalmente a 105 °C, referido al volumen aparente inicial en unas determinadas condiciones de humedad (generalmente saturación y drenaje posterior a 10 cm de tensión de columna de agua) (Martínez, 1992). Este parámetro informa sobre el grado de variación del volumen del sustrato bajo condiciones de cultivo, en ciclos de humectación-deseccación. La contracción del volumen facilita la compactación del sustrato y la compresión de las raíces, disminuyendo la eficiencia del riego y de la fertilización (Conover y Poole, 1981; Fonteno *et al.*, 1981). El nivel máximo admisible es 30 % (Abad *et al.*, 1993).

4.10.3.2. Propiedades fisico-químicas y químicas

Las propiedades fisico-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.

4.10.3.2.1. pH

Las plantas pueden sobrevivir en un amplio intervalo de pH del sustrato sin sufrir desórdenes fisiológicos aparentes, siempre y cuando todos los nutrientes se suministren en forma “asimilable”. No obstante, el crecimiento y desarrollo de la planta se ven reducidos de modo marcado en condiciones de acidez o alcalinidad extremas. El pH ejerce sus efectos principales sobre la asimilabilidad de los nutrientes, la capacidad de intercambio catiónico y la actividad biológica (Raviv *et al.*, 1986; Bunt, 1988; Handreck y Black, 1991); bajo condiciones de cultivo intensivo, se recomienda mantener el pH del sustrato dentro de un intervalo reducido. Así, en el cultivo de las plantas ornamentales en contenedor, el nivel de referencia del pH (pasta saturada) oscila entre 5.2 y 6.3 (Abad *et al.*, 1993), y en el caso del cultivo hidropónico de hortalizas, el valor óptimo del pH (solución del sustrato) se sitúa entre 5.5 y 6.8 (Escudero, 1993).

La asimilabilidad de los elementos nutritivos se ve afectada de modo importante por el pH. Con pH de 5.0 a 6.5, la mayoría de los nutrientes mantienen su máximo nivel de asimilabilidad. Por debajo de pH 5,0 pueden presentarse deficiencias de N, K, Ca, Mg, B, etc, mientras que por encima de pH 6,5 puede disminuir la asimilabilidad de P, Fe, Mn, B, Zn y Cu (Peterson, 1981). Los óxidos metálicos (Fe, Mn, Cu, Zn, etc) se hacen más solubles al bajar el pH (por debajo de 5,0), pudiendo llegar a resultar fitotóxicos. Por otro lado, el pH óptimo de los sustratos orgánicos (5.2-6.3) es también el más favorable para la actividad de los microorganismos beneficiosos para las plantas (bacterias nitrificantes, hongos micorrízicos, etc) (Handreck y Black, 1991). Si el pH de un sustrato orgánico está fuera del intervalo recomendado, se deberá llevar a cabo el ajuste del mismo. Así, en el caso de los sustratos ácidos (turba *Sphagnum* p. ej.), se requiere la adición de cal o dolomita para provocar un incremento en el pH. El pH alcalino de los sustratos básicos (*ej.*

corteza de pino) puede reducirse mediante la adición de azufre. La cantidad de cal o azufre a añadir al sustrato depende del pH original, del pH final a alcanzar y de la capacidad de intercambio catiónico, siendo la necesidad de enmienda tanto mayor cuanto mayor es la capacidad de cambio del material (Bunt, 1988; Martínez *et al.*, 1988; Handreck y Black, 1991).

El pH alcalino de algunos sustratos minerales inertes (lana de roca, perlita, etc) puede ser neutralizado por la solución nutritiva (Abad, 1995; Abad y Noguera, 1998).

4.10.3.2.2. Salinidad

Mide la concentración de sales solubles presentes en la solución del sustrato. Según Bunt (1988) y Lemaire *et al.* (1989), las causas que originan un incremento en la salinidad del sustrato, una vez introducido en el contenedor, son: a) la presencia de fertilizantes insolubles -como los de liberación lenta-, cuando se degradan para producir nitratos, o bien cuando liberan sales mediante difusión, en una cuantía superior a las cantidades absorbidas o lixiviadas; b) cuando la cantidad de sales aportadas con el agua de riego o la solución nutritiva son superiores a las cantidades absorbidas por la planta más las pérdidas por lixiviación; y c) cuando el sustrato presenta una alta capacidad de intercambio catiónico y, al mismo tiempo, se descompone durante el transcurso del cultivo liberando nutrientes. Todas estas situaciones pueden ser prevenidas, en gran parte, conociendo las cantidades de fertilizantes requeridas por el cultivo y evitando aplicaciones excesivas de los mismos. El incremento en la salinidad de un sustrato puede prevenirse o corregirse mediante lixiviación controlada (Kerr y Hanan, 1985; Abad *et al.*, 1989 a y b; Marfá *et al.*, 1998). En la práctica del riego en el cultivo en sustrato, el agua se maneja de manera excedentaria con objeto de evitar la acumulación de sales por lavado. Este exceso varía en función de la época del año, el estado de desarrollo de la planta y la calidad del agua de riego. La respuesta de las plantas a la salinidad varía en función de su edad, condiciones ambientales, manejo del cultivo y características de la especie (ASCE, 1990).

4.10.3.2.3. Capacidad de intercambio catiónico

Se define como la suma de los cationes que pueden ser adsorbidos por unidad de peso (o de volumen) del sustrato. Estos cationes están disponibles para la planta y no son lixiviados por efecto del riego. El valor óptimo de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los sustratos está estrechamente relacionado con la frecuencia de la fertirrigación (Lemaire *et al.*, 1989). Si la fertirrigación se aplica permanentemente, la capacidad de

adsorción de cationes no constituye ninguna ventaja, siendo recomendable -en este caso- la utilización de materiales inertes, con muy baja o nula capacidad de intercambio catiónico. Si por el contrario, la fertirrigación se aplica de modo intermitente, será conveniente utilizar sustratos con una capacidad de intercambio catiónico de moderada a elevada, es decir, superior a 20 meq/100 g ms (Abad *et al.*, 1993). Los materiales orgánicos poseen una elevada capacidad de intercambio catiónico y una alta capacidad tampón frente a cambios rápidos en la disponibilidad de los nutrientes y en el pH (Wilson, 1984). Varía en función del pH: cuanto más alto es el pH, más elevada es la capacidad de intercambio catiónico (Ansorena 1994). Así, por ejemplo, para una turba *Sphagnum* rubia, la capacidad de intercambio catiónico se incrementó desde 50 meq/100 g ms hasta 100 meq/100 g ms al aumentar el pH de 3.5 a 5.5 (Puustjärvi, 1994). Como consecuencia del encalado de las turbas *Sphagnum*, se produce un incremento en la capacidad de intercambio catiónico, aumentando la proporción de cationes que pueden ser adsorbidos sobre los centros activos. Ciertos sustratos minerales de naturaleza arcillosa, como la vermiculita, tienen la propiedad de adsorber o fijar cationes superficialmente mediante sustituciones catiónicas o isomorfias en los cristales del mineral (Abad, 1993; Abad y Noguera, 1998). Algunos autores han indicado que los sustratos para el cultivo hidropónico de hortalizas deberían presentar una bajísima o nula capacidad de intercambio catiónico; es decir, deberían ser químicamente inertes con objeto de permitir un mejor control nutricional de la planta (Martínez y García, 1993) o evitar problemas de salinización del sustrato (Lemaire *et al.*, 1989).

4.11. Producción de Biomasa.

La biomasa (w) es el peso del material vegetal viviente, contenido arriba y debajo de una unidad de superficie por unidad de tiempo, y constituye la energía química almacenada en la planta que puede ser recolectada para alimento, combustible, fibra u otros usos (Coombs, 1988).

4.11.1. Producción primaria neta (P_n) ó materia seca acumulada total.

La producción primaria neta (P_n), es la cantidad total de materia orgánica asimilada menos la pérdida debido a la respiración (R), esto es la, la producción total disponible para otros niveles tróficos o que queda como energía química almacenada. Esta puede ser expresada en términos de peso seco de materia orgánica (Coombs, 1988).

4.12. Glosario de Términos de la Investigación.

(PMP): se refiere al punto de marchitez permanente del sustrato.

(CC): se refiere a la capacidad de campo o de sustrato como la máxima cantidad de agua retenida por éste por un cierto tiempo.

HRE: se refiere a la humedad residual como la cantidad de agua que queda en el sustrato después de haberse consumido un porcentaje del agua de manera controlada.

Consumo Permisible: se refiere al contenido mínimo de agua en el suelo, permitido antes de cada riego, de manera que no se presenten condiciones indeseables de tensión de humedad para el cultivo.

Tutoraje del cultivo: se refiere a la actividad de dirigir a la planta sobre un solo eje para evitar la bifurcación del tallo.

ETP: se refiere a la evapotranspiración como la pérdida de agua en forma de vapor a través de los estomas por parte del cultivo más la evaporación del sustrato.

Curva característica de retención de humedad: se refiere a la curva de retención de agua que relaciona el potencial matricial con el contenido de agua del sustrato.

Riego localizado: se refiere al riego que se aplica de manera puntual específicamente en la raíz de la planta, el cual generalmente es por goteo o microaspersión.

Densidad aparente (ρ_a): se define como la relación de la masa del suelo seco a 110 °C entre el volumen total expresada en g/cm^3 .

HA: se refiere a la humedad aprovechable como la diferencia entre la humedad a capacidad de campo menos la humedad a punto de marchitez permanente o el agua que está fácilmente disponible para los cultivos.

Tiempo de riego: se refiere a la duración de la aplicación del agua en el sustrato de la planta hasta que ésta llega a su capacidad de campo o de sustrato.

Frecuencia de riego: se refiere a el número de veces que se aplica el riego al cultivo poniendolo en cada ocasión a capacidad de campo o de sustrato.

Lámina de riego: se refiere a la cantidad de agua aplicada al suelo o sustrato en centímetros y que humedece toda la profundidad radicular de la planta.

Momento de riego: se refiere al intervalo de tiempo en que la planta debe ser abastecida de agua para evitar esfuerzos por parte de las raíces que pueden repercutir en bajos rendimientos.

Valor medio de unavariante: se refiere al promedio de las observaciones de una variable.

Modelos Base: se refiere a los modelos lineales que presentaron los mejores estadísticos de ajuste como es la Desviación Absoluta Promedio (DAP) y el coeficiente de determinación (R^2).

(DAP) Desviación Absoluta Promedio: se refiere a la sumatoria de los valores absolutos de las diferencias de los valores observados menos los estimados, divididos entre los observados, multiplicados por cien y divididos entre el número de observaciones.

Humedad equivalente: se refiere a un mismo volumen de agua colocado en varios sustratos cada uno con diferente diámetro de granulometría.

Follaje: Se refiere al conjunto de hojas de la planta equivalente a la cobertura foliar.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Ubicación del Experimento

El trabajo de investigación se llevó a cabo en un invernadero del Colegio de Postgraduados, ubicado en el Campus Montecillo, Estado de México, cuya localización geográfica es de: $19^{\circ} 30'$ de latitud norte y $98^{\circ} 53'$ de longitud oeste; con una altitud de 2250 m sobre el nivel del mar. En la figura 5-1 se indica el invernadero donde se desarrolló el experimento.



Fig. 5-1 Invernadero donde se desarrolló el experimento

5.2. Diseño Experimental y Tratamientos

El experimento contempló 11 tratamientos con 3 repeticiones, de éstos once, dos de ellos se manejaron como niveles de humedad extrema, uno a capacidad de campo (CC) y el otro a punto de marchitez permanente (PMP) ambos considerando granulometría fina de sustrato. Los tratamientos se formaron considerando dos factores: 1) % de Humedad Residual y 2) Granulometría del Sustrato; respecto a la humedad se manejaron tres rangos: 100-75, 100-45 y 100-15%. En cuanto al sustrato, se utilizaron tres diámetros de granulometría: $\text{Ø} \leq 2.0$ mm, $\text{Ø} 2$ a 5 mm y $\text{Ø} \geq 5.0$ mm. El diseño experimental utilizado fue un completamente aleatorizado. Los factores y niveles considerados, así como los tratamientos resultantes se muestran en las tablas 5-1 y 5-2. Las figura 5-1a y 5-2 muestran la distribución de tratamientos en el invernadero.

5.2.1. Distribución de plantas en tratamientos

Factor1: % de Humedad

Factor2: Granulometría del Sustrato.

75 % de Humedad...(1)

$\varnothing \leq 2.0$ mm.....(1)

45 % de Humedad...(2)

\varnothing 2 a 5 mm...(2)

15 % de Humedad...(3)

$\varnothing \geq 5.0$ mm(3)

100-95 % de Humedad...(4)

10-5 % de Humedad.....(5)

Los tratamientos se consideraron como: $T_{i,j}$, Donde: i, corresponde al nivel de humedad y j, se refiere al diámetro de la granulometría del sustrato, por lo que:

$i = 1,2,3,4,5$ y de igual forma $j = 1,2,3$, respectivamente.

Tabla 5-1: Factores y niveles considerados en la formación de Tratamientos.

FACTOR	NIVELES				
% HUMEDAD RESIDUAL	% de Humedad Consumida respecto a la aprovechable				
	**25% *HRE =75%	**55% HRE 45%	**85% HRE 15%	**C.C. 5 % HRE 95 %	**PMP 95% HRE 5 %
GRANULOMETRÍA	Diámetro del Sustrato				
	Fina $\varnothing \leq 2.0$ mm.	Mediana \varnothing 2 a 5 mm.		Gruesa $\varnothing \geq 5.0$ mm	

*HRE = Humedad Residual

**= % de Humedad Consumida respecto a la Aprovechable.

**C.C. = % de humedad a capacidad de campo.

**PMP. = % de humedad a punto de marchitez permanente.

Tabla 5-2. Nomenclatura y Composición de Tratamientos.

TTMTOS (Ti,j)	NOMENCLATURA	COMPOSICIÓN
T1	HRE (75 %), $\varnothing \leq 2.0$ mm.	75% de Humedad Residual+Granulometría del sustrato $\varnothing \leq 2.0$ mm.
T2	HRE (75 %), $\varnothing 2$ a 5 mm.	75% de Humedad Residual+Granulometría del Sustrato $\varnothing 2$ a 5 mm.
T3	HRE (75 %), $\varnothing \geq 5.0$ mm	75% de Humedad Residual+Granulometría del Sustrato $\varnothing \geq 5.0$ mm.
T4	HRE (45 %), $\varnothing \leq 2.0$ mm.	45% de Humedad Residual+Granulometría del Sustrato $\varnothing \leq 2.0$ mm.
T5	HRE (45 %), $\varnothing 2$ a 5 mm.	45% de Humedad Residual+Granulometría del Sustrato $\varnothing 2$ a 5 mm.
T6	HRE (45 %), $\varnothing \geq 5.0$ mm	45% de Humedad Residual+Granulometría del Sustrato $\varnothing \geq 5.0$ mm.
T7	HRE (15 %), $\varnothing \leq 2.0$ mm.	15% de Humedad Residual+Granulometría del Sustrato $\varnothing \leq 2.0$ mm.
T8	HRE (15 %), $\varnothing 2$ a 5 mm.	15% de Humedad Residual+Granulometría del Sustrato $\varnothing 2$ a 5 mm.
T9	HRE (15 %), $\varnothing \geq 5.0$ mm	15% de Humedad Residual+Granulometría del Sustrato $\varnothing \geq 5.0$ mm.
T10(CC)	HRE (100%), $\varnothing \leq 2.0$ mm.	100% de Humedad Residual+ Granulometría del Sustrato $\varnothing \leq 2.0$ mm.
T11(PMP)	HRE (10-5 %), $\varnothing \leq 2.0$ mm.	10 a 5 % de Humedad Residual+ Granulometría del Sustrato $\varnothing \leq 2.0$ mm.

TTMTOS= Tratamientos.

T (CC) = Tratamiento a capacidad de campo.

T (PMP) = Tratamiento a punto de marchitez permanente.

HRE = Humedad residual en %.

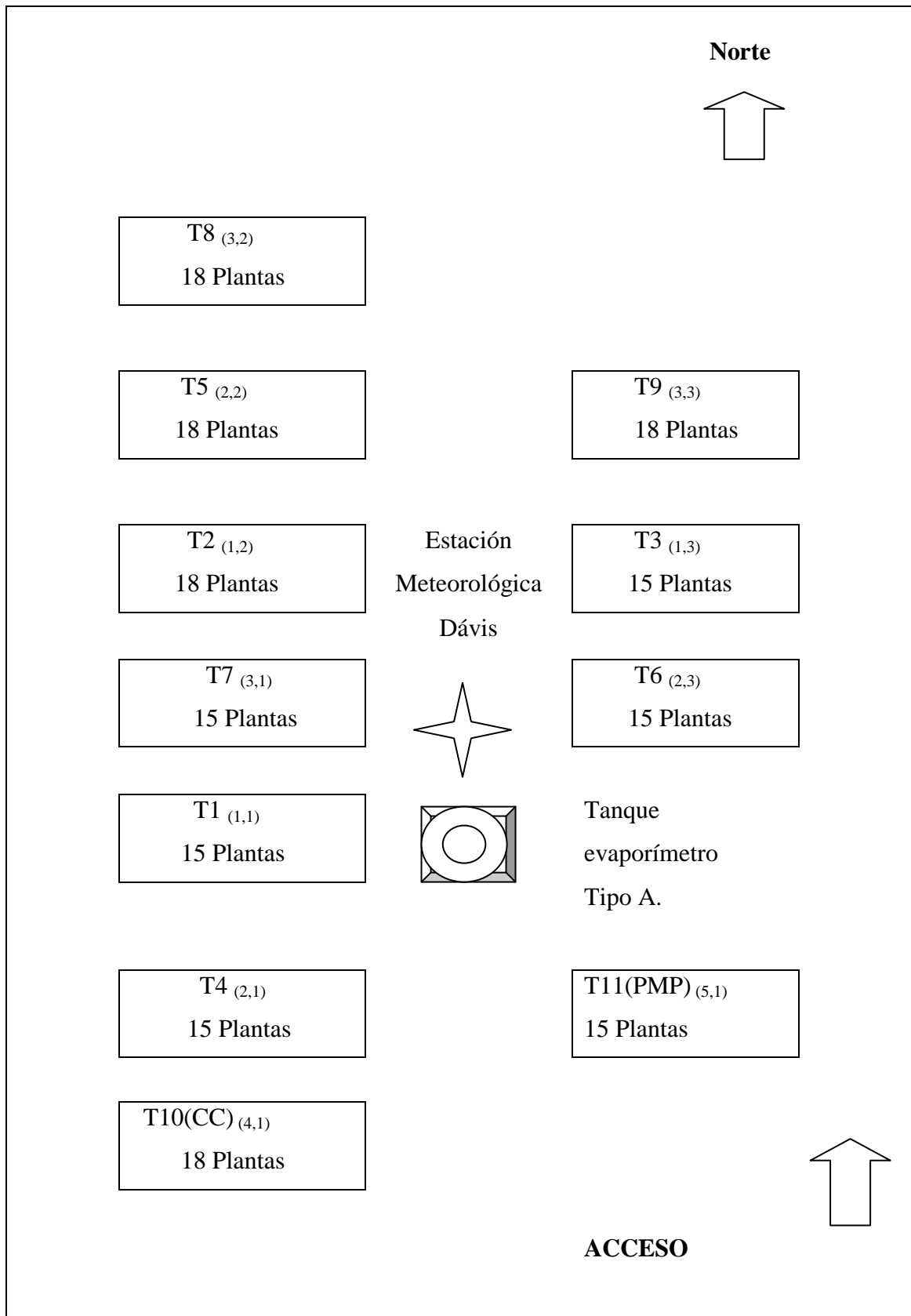


Fig. 5-1a Distribución de tratamientos en el invernadero
T1, T2, T3,.....T11 = Número de tratamientos.



Fig. 5-2 Distribución de plantas en el invernadero

5.2.2. Análisis estadístico de tratamientos

Se realizó el análisis de varianza para el diseño completamente aleatorizado considerado en el experimento para analizar los efectos de los tratamientos considerando como variables de respuesta los valores observados de las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje y los rendimientos del cultivo de jitomate por planta considerando el promedio de tres cortes. También se utilizaron otros parámetros estadísticos para el ajuste de modelos lineales estimados. Los resultados obtenidos de este análisis se presentan en el capítulo de resultados de este trabajo.

5.3. Manejo del Cultivo

5.3.1. Siembra

Esta se realizó el 16 de abril del 2007 en charolas de unicel blanco utilizando como sustrato inicial peat moss para la germinación de la plántula, dichas plántulas se mantuvieron en las charolas semilleras por un periodo de 40 días para después ser transplantadas en el sustrato definitivo (Fig. 5-3).



Fig. 5-3 Almacigo de plantas de jitomate en charolas de unicel

5.3.2. Variedad utilizada

Se utilizó Cimabue (To 1482), y de acuerdo con la compañía productora (Ahern, internacional seeds, inc.), corresponde a un híbrido de crecimiento indeterminado de excelente vigor y cobertura con buena uniformidad de planta, madurez intermedia con frutos de peso promedio de 110 a 130 gramos y su forma es de ciruela alargada.

Es resistente y tolerante a ciertas enfermedades como:

Verticillum, Fusarium, Nemátodos, Pseudomonas tomato, Vírus Mosaico del Tomate, Peca bacteriana del tomate (*Pseudomonas Syringae* pv. Tomato).

5.3.3. Transplante

La siembra definitiva o transplante se realizó el 26 de mayo del 2007 sobre un sustrato de tezontle rojo colocado en cubetas con capacidad de aproximadamente siete litros, las cuales se distribuyeron en el invernadero en función del diseño experimental y tratamientos considerados (Fig. 5-4).



Fig. 5-4 Transplante de plantas de jitomate en tezontle rojo

5.3.4. Sustrato

Antes de realizar el trasplante, se determinaron algunas propiedades físicas del sustrato (tezontle rojo) tales como densidad aparente, punto de marchitamiento permanente y capacidad de campo. Este sustrato se desinfectó para prevenir posibles brotes de patógenos utilizando hipoclorito de sodio al 1 % y aplicación de vapor a presión (Fig. 5-5).



Fig. 5-5 Tezontle rojo con tres diámetros de granulometría usados en el experimento

5.3.5. Evapotranspiración

Respecto a la evapotranspiración, esta se obtuvo de la estación meteorológica automatizada tipo Davis. También se estimó a través del tanque evaporímetro (tipo A) introduciendo el factor de 0.7, esto es: $ETP = 0.7(Ev)$ para contar con datos de reserva en caso de fallas en la estación automatizada. Respecto al método del tanque (Martínez, 2005) indica que para diseño y manejo de riego localizado, este método ha dado buen resultado en invernaderos, ya que éste integra diferentes variables climáticas como radiación, temperatura y viento, fig. (5-6).



Fig. 5-6 Tanque evaporímetro tipo A utilizado en la investigación

5.3.6. Riego

Éste se aplicó por goteo (Fig. 5-7) y su abastecimiento dependió de la lamina estimada para cada tratamiento, dicho riego se controló a través de lecturas obtenidas con el TDR (Time Domain Reflectometry) transformadas a porcentajes de humedad, previa calibración del equipo, así como por el monitoreo de la evapotranspiración horaria proporcionada en tiempo real por la estación automática tipo Davis.



Fig. 5-7 Riego por goteo con sistema tipo espagueti sobre contenedores de sustrato

5.4. Solución Nutritiva

Se estableció el trabajo de investigación bajo condiciones de invernadero y se aplicó mediante riego por goteo una solución nutritiva de Stainer, durante todo el ciclo fenológico del cultivo, la misma para cada uno de los tratamientos, con la finalidad de tener las mismas condiciones de nutrición para todas las plantas variando únicamente las láminas de riego de los tratamientos y la granulometría del sustrato de acuerdo a los tratamientos establecidos, ver figuras (5-8a, 5-8b y 5-8c). Esta solución se balanceo previamente para determinar las cantidades y las fuentes de fertilizantes comerciales solubles utilizadas, considerando el 100% de ésta para todas las etapas fenológicas del cultivo. Las tablas (5-3) y (5-4) muestran el balanceo de la ecuación de Stainer para este caso y los gramos de fertilizante por cada 100 litros de agua contenidos en dicha solución nutritiva.

Tabla 5-3 Balanceo de solución nutritiva

Iones (meq/l)	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	NH ₄ ⁺	Na ⁺	SC	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	SA	meq/l
Requerimiento	9	4	7			20	12	1	7		20	
Análisis de agua	0.9	1	0.21	0	0.8		1	0	1.11	0.7		
Requerimiento ajustado	8.1	3	6.79	0	-0.8		11	1	5.89	-0.7		
REACTIVOS												
Ca(NO ₃) ₂	8.1						8.1					8.1
K ₂ SO ₄			3.89						3.89			3.89
NH ₄ H ₂ PO ₄				1				1				1
KNO ₃			2.9				2.9					2.9
MgSO ₄		3							3			3
Suma=====	8.1	3	6.79	1			11	1	6.89			
REQUERIDO												

Tabla 5-4 Solución Nutritiva de Stainer al 100%

Tanque	Fertilizante	me /L	PE	g/L	Pureza	g/L.....C/p	kg/100L	g/100L
A	Ca(NO ₃) ₂	8.1	118	0.96	90	1.062	0.1062	106.20
	KNO ₃	2.9	101	0.29	95	0.308	0.0308	30.83
	NH ₄ H ₂ PO ₄	1	115	0.12	95	0.121	0.0121	12.11
B	MgSO ₄	3	123	0.37	95	0.388	0.0388	38.84
	K ₂ SO ₄	3.89	87.2	0.34	95	0.357	0.0357	35.71

Donde:

Ca(NO₃)₂ = Nitrato de calcio

KNO₃ = Nitrato de potasio

NH₄H₂PO₄ = Fosfato monoamónico

MgSO₄ = Sulfato de magnesio

K₂SO₄ = Sulfato de Potasio.



Fig. 5-8a Depósitos usados para la solución nutritiva



Fig. 5-8b Sistema de conducción del agua con solución nutritiva para el experimento



Fig. 5-8c Cantidades y tipos de fertilizantes usados en la solución nutritiva

5.4.1. Salinidad del sustrato

Respecto a la salinidad, de manera periódica en el laboratorio y de forma manual mediante potenciómetro se realizaron análisis químicos de pH y Conductividad eléctrica de la solución nutritiva con el fin de monitorear y equilibrar la cantidad de sales en el sustrato, procurando mantener el pH de la solución de riego en un rango de 6 a 6.5 y una (CE) del sustrato menor que 3.0 dS/m (Sandoval y Brizuela, 2002).

5.5. Control Fitosanitario

Durante el desarrollo del cultivo se realizaron las aplicaciones preventivas necesarias de bactericidas y fungicidas tales como curzate y captan para proteger al cultivo del brote de fitopatógenos.

5.6. Labores Culturales

Después del desarrollo vegetativo y antes de los periodos de floración y fructificación se hicieron desyemes al cultivo de jitomate, con el propósito de dirigir a la planta sobre un solo eje y evitar su bifurcación lo cual se ha demostrado que trae como consecuencia frutos más pequeños. De la misma forma se llevó a cabo el tutoraje para propiciarle mayor fortaleza y apoyo a las plantas en cuestión y para dirigir su crecimiento en forma vertical y soportar el peso de los frutos.

5.7. Calibración de Equipos

5.7.1. Instalación de estación automática Davis

Se instaló la estación meteorológica automática tipo Davis dentro del invernadero, en la cual se colocaron sensores de temperatura y humedad del ambiente, radiación solar, simulación de humedad en la hoja, y sensor de dirección y velocidad del viento. Dichos sensores fueron conectados a un panel de control o consola para el registro de datos instantáneos, y de ese punto se llevó la conexión directamente a una computadora para el almacenamiento de esta información agrometeorológica en los archivos del programa GROW figuras (5-9a y 5-9b).



Fig. 5-9a Instalación de estación automática Davis mostrando sensores de temperatura y radiación solar

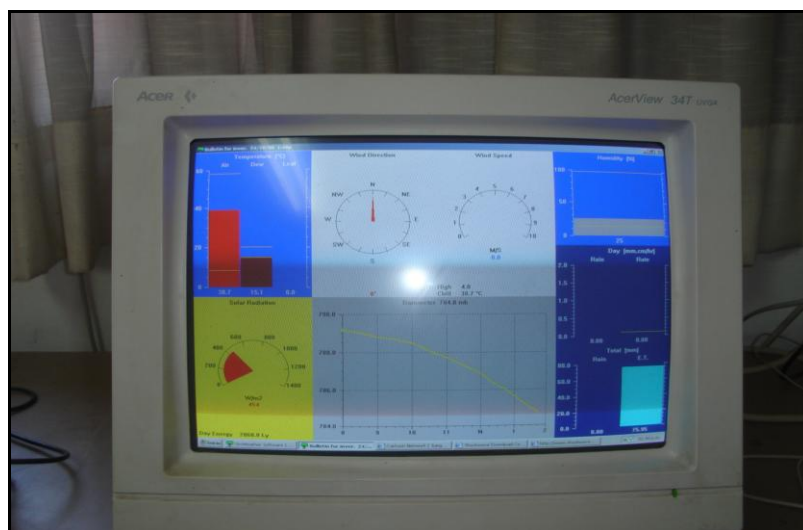


Fig. 5-9b Monitoreo en tiempo real de variables meteorológicas del invernadero con programa Grow

5.7.2. Calibración del TDR (Time Domain Reflectometry).

Esta técnica de reflectometría temporal, es un método que mide el tiempo de recorrido de un pulso electromagnético, que varía con el contenido de agua en el suelo o sustrato (Flores, 2005).

Para la calibración de este equipo se consideró el tratamiento de sustrato de granulometría fina $\varnothing \leq 2.0\text{mm}$ debido a que se ha demostrado que este equipo proporciona resultados mas precisos en sustratos de textura fina sobre todo en suelos para lo cual fue diseñado, tabla (5-5) y figura (5-10). El procedimiento de calibración fue el siguiente:

- a) Utilización de tezontle rojo tamizado mediante una criba de 2 mm de diámetro secado al aire.
- b) Se colocó un volumen conocido de este sustrato en veintiún contenedores representando el número de muestras.
- c) A cada muestra del sustrato se le aplicó un volumen diferente de agua correspondiente a un % de humedad específico.
- d) Los volúmenes de agua aplicados a las muestras, equivalentes a los porcentajes de humedad fueron: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95 y 100 % asumiendo como límites inferior y superior el PMP de 5 a 10% y CC de 95 a 100% de la humedad aprovechable del sustrato respectivamente.
- e) Los valores más extremos de la calibración fueron cero % de humedad para el sustrato secado al aire y humedad > al 100 % correspondiente al agua libre o sustrato a saturación.
- f) Establecidos los pasos anteriores, se introdujo el sensor del TDR (punta de la varilla) a una profundidad media de 10 cm, en cada una de las muestras y se esperó alrededor de un minuto para obtener las lecturas de dicho aparato para cada muestra y % de humedad.

- g) Obtenidas las lecturas del TDR correspondientes a cada % de humedad, se correlacionaron estos valores mediante una gráfica de dispersión, a la cual se le ajustó una curva de tipo polinomial la que presentó una $R^2 = 0.96$, además de su ecuación específica.
- h) Se evaluaron los datos de las lecturas observadas del TDR con la ecuación de la curva obtenida para estimar el % de humedad del sustrato; en los resultados de esta evaluación se observó una sobreestimación de los porcentajes de humedad con respecto a los originales. En la tabla (5-5) se enlistan las lecturas de TDR observadas y el % de humedad estimada a través de la curva polinomial ajustada y en la figura (5-11) se muestra la curva ajustada y su ecuación correspondiente.

Tabla 5-5 Lecturas observadas en el TDR para diferentes porcentajes de humedad y el % de humedad estimada mediante modelo polinómico, para sustrato de granulometría fina.

* Lectura observada del TDR	%humedad adicionada en sustrato (Calibración del TDR)	%humedad en sustrato estimada
0.72684	0	12
0.72983	5	16
0.73076	10	17
0.73114	15	17
0.73298	20	20
0.73374	25	20
0.73620	30	23
0.73915	35	27
0.74510	40	33
0.74725	45	36
0.75536	50	44
0.76418	55	52
0.77476	60	61
0.77980	65	65
0.78634	70	70
0.79433	75	76
0.81081	80	85
0.82298	85	91
0.83098	90	93
0.84513	95	97
0.86005	100	99

*= Pulsaciones eléctricas emitidas por el TDR.



Fig. 5-10 Calibración del TDR en tezontle rojo para diferentes porcentajes de humedad

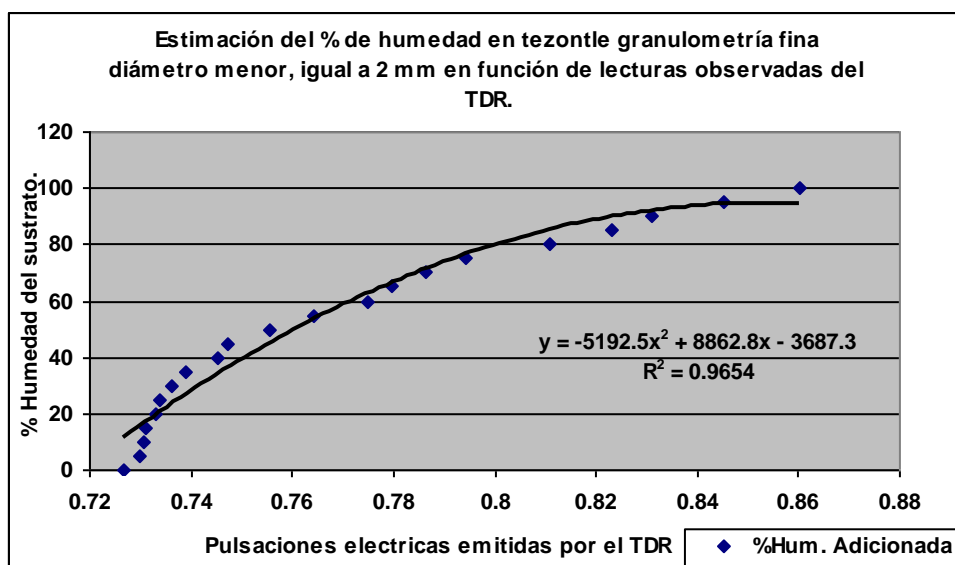


Fig. 5-11 Curva polinómica ajustada y estimación del % de humedad en función de lecturas del TDR

%Hum = Porcentaje de humedad adicionada al sustrato.

———— = Humedad estimada en el sustrato con modelo.

5.7.3. Mediciones de la temperatura foliar de la hoja.

Respecto al termómetro de infrarrojo, se trabajó con este equipo realizando mediciones en diferentes superficies de la planta de jitomate pero principalmente en la superficie foliar de cada tratamiento establecido, a una distancia de 20 cm de la hoja en ángulo de 90° respecto a la superficie foliar. Estas mediciones se llevaron a cabo a diferentes horas del día tales como 8:00 am, 12:00 pm (medio día), 14:00 pm, 14:30 pm, 15:00 pm y 18:00 pm (Fig. 5-12).



Fig. 5-12 Toma de datos de temperatura foliar y humedad del sustrato de forma simultánea

5.8. Manejo del Sustrato

El sustrato utilizado fue tezontle rojo, el cual se tamizó para tener tres diámetros de granulometría: granulometría menor o igual a 2 mm, 2 a 5 mm y mayor o igual a 5 mm respectivamente (Fig. 5-13). Además se determinó el porcentaje de humedad a capacidad de campo del sustrato, el punto de marchitez permanente (PMP), así como la densidad aparente (ρ_a) necesarias para calcular las láminas de riego para cada uno de los tratamientos manejados. En este trabajo, los términos de CC (capacidad de campo) y PMP (punto de marchitez permanente) se manejan como equivalentes de la CS (capacidad de sustrato) y PMPS (punto de marchitez permanente del sustrato), por referirse a los mismos conceptos de retención de humedad, solo que en los dos primeros casos se aplica específicamente para suelos y en los segundos casos se aplica para materiales inertes orgánicos e inorgánicos.



Fig. 5-13 Tratamientos probados de granulometrías de sustrato

En la figura 5-13, se presentan los tratamientos de granulometrías de sustrato probados, mostrando de arriba hacia abajo las hileras correspondientes a cada granulometría, comenzando por la granulometría gruesa $\text{Ø} \geq 5\text{mm}$, granulometría mediana $\text{Ø} 2\text{-}5\text{mm}$ y granulometría fina $\text{Ø} \leq 2\text{mm}$ respectivamente.

5.8.1. Humedad a capacidad de campo en el sustrato

Para la determinación del porcentaje de humedad a capacidad de campo del tezontle rojo tamizado para las diferentes granulometrías, se realizaron pruebas tanto empíricas (Fig. 5-14), como de laboratorio, en este caso la prueba de laboratorio utilizada fue el método de columnas. En tabla (5-6) se presentan algunos parámetros de humedad obtenidos en el laboratorio de prácticas de RASPA del postgrado de Hidrociencias. Con dichos valores se estimaron las láminas de riego correspondientes para los niveles de humedad establecidos en cada uno de los tratamientos considerados y cuyos rangos fueron los siguientes: T1: 100-75% h, T4: 100-45% h, T7: 100-15% h respectivamente.

Tabla 5-6 Indices de humedad obtenidos por el método de las columnas

Muestra	Dap g/cm ³	PMP (%)	Cap de Campo (%)
Tezontle fino $\text{Ø} \leq 2\text{mm}$	1.23	10.04	20.08
Tezontle mediano $\text{Ø} 2-5\text{mm}$	0.67	8.06	16.12
Tezontle grueso $\text{Ø} \geq 5\text{mm}$	0.78	7.06	14.12



Fig. 5-14 Determinación de capacidad de campo en tezontle con granulometría fina con método empírico, en cinco muestras por tratamiento.

5.9. Cálculo de la Humedad Residual y Aprovechable

Para calcular la humedad residual y aprovechable para los tres tratamientos con granulometrías diferentes, se consideraron los siguientes datos de laboratorio, ver (Tabla 5-7).

Tabla 5-7 Datos de laboratorio involucrados en estimación de humedad residual y aprovechable.

Tratamiento(por granulometria)	Dap g/cm ³	PMP (%)	Cap Campo (%)
Tezontle fino $\varnothing \leq 2\text{mm}$	1.23	10.04	20.08
Tezontle mediano $\varnothing 2-5\text{mm}$.	0.67	8.06	16.12
Tezontle grueso $\varnothing \geq 5\text{mm}$.	0.78	7.06	14.12

Para calcular la humedad residual (HRE) correspondiente a los límites de humedad establecidos en los tratamientos (T1= 75% HRE, T4= 45% HRE y T7= 15% HRE), esta se calculó mediante el procedimiento de la humedad aprovechable.

5.9.1. Cálculo de la humedad residual en función de la humedad aprovechable:

- a) Datos conocidos: C.C = % humedad a capacidad de campo y PMP=% humedad a punto de marchitez permanente.

- b) Obtención de la humedad aprovechable, donde (HA)= CC-PMP. Asumiendo que (HA) representa el 100%, entonces los límites de humedad residual (HRE) establecidos en los tratamientos corresponden a un % de la (HA), los cuales se obtienen con una regla de tres y cuyo resultado se suma al valor original de PMP para obtener el parámetro de humedad aprovechable que corresponde al porcentaje de humedad residual establecido.

c) Ejemplo: cálculo de la (HRE) para los tres tratamientos de humedad en sustrato fino $\varnothing \leq 2\text{mm}$.

$$\text{CC} = 20.08 \% \text{h}, \text{PMP} = 10.04 \% \text{h}, \text{HA} = \text{CC} - \text{PMP} = (20.08 - 10.04) = 10.04 \% \text{h}$$

Si, $\text{HA} = 10.04 = 100\%$, entonces el 15% HRE = 1.5% HRE, por lo tanto al sumar el valor de 1.5% HA al valor original de PMP se tiene que: $(1.5 + 10.04) = 11.54 \%$, este valor obtenido representa el parámetro de humedad aprovechable en el sustrato correspondiente al 15% de HRE, de esta forma los demás límites de humedad establecidos 45 y 75 % HRE corresponden a los parámetros 14.55 y 17.57 de humedad aprovechable respectivamente.

En la tabla (5-8) se resumen estos valores de humedad calculados para los cinco tratamientos de humedad y tres granulometrías considerados y expresados en porcentaje de humedad y que constituyen la humedad residual aprovechable (HRE).

Tabla 5-8 Resumen de parámetros de humedad calculados para los cinco tratamientos de humedad y granulometrías considerados

Diámetro del sustrato	% Humedad establecido	% de humedad para cada tratamiento
$\varnothing \leq 2\text{mm}$	CC	20.08
	75	17.57
	45	14.55
	15	11.54
	PMP	10.04
$\varnothing 2-5\text{mm}$	CC	16.12
	75	14.10
	45	11.68
	15	9.26
	PMP	8.06
$\varnothing 2-5\text{mm}$	CC	14.12
	75	12.35
	45	10.23
	15	8.11
	PMP	7.06

5.10. Estimación de Láminas de Riego

Se estimaron las láminas, tiempos y frecuencias de riego para los tratamientos de humedad y granulometrías del sustrato (tezontle rojo), utilizando los datos de laboratorio: capacidad de campo, punto de marchitez permanente y densidad aparente Tabla 5-7 indicada párrafos atrás. Para la obtención de estas láminas de riego se empleó el método de humedad residual en función del % de humedad aprovechable. En las Tablas (5-9, 5-10 y 5-11) se resumen los resultados correspondientes a dichas láminas de riego según el diámetro del sustrato.

5.10.1. Láminas de riego

Para su cálculo se empleó la siguiente expresión de acuerdo a De la Peña y Llerena (2001).

$$LR \text{ cm} = ((P_{cc} - P_{pmp})/100)(D_a)(P_r) \dots \dots \dots EC 1.$$

DONDE:

LR cm = Lamina de riego en centímetros.

Pcc = Porcentaje de humedad a capacidad de campo en %.

Pmp = Porcentaje de humedad a punto de marchitez permanente en %.

Da = Densidad aparente en g/cm³.

Pr = Profundidad radicular en centímetros cm.

5.10.2. Tiempo de riego

El tiempo de riego respecto a cada tratamiento de humedad y granulometría se estimó una vez calculadas las láminas de riego dividiendo cada una de éstas entre el gasto de los goteros previa calibración de los mismos, cuyo valor específico fue de 10 ml/minuto, por lo que la expresión para el tiempo de riego fue:

TR = LRV ml/Q goteros.....EC. 2.

DONDE:

TR = Tiempo de riego en segundos, minutos u horas.

LRV = Lamina de riego en volumen reportada en ml.

Q goteros = Gasto estimado de los goteros en ml/min.

AC = Área del contenedor = 346 cm².

5.10.3. Frecuencia de riego

La frecuencia de riegos se determinó considerando los límites establecidos del consumo de agua permisible y la cantidad de evapotranspiración registrada en tiempo real a través de la estación agrometeorológica automatizada tipo Davis por tratamiento de humedad y granulometría (75, 45 y 15 % de humedad) y ($\varnothing \leq 2\text{mm}$, $\varnothing 2$ a 5mm y $\varnothing \geq 5\text{mm}$), el procedimiento fue el siguiente:

- Se estimaron las láminas de reposición para cada tratamiento de humedad tomando como parámetros los índices de capacidad de campo obtenidos en el laboratorio y como PMP los valores establecidos como límites de humedad residual (HR) para cada tratamiento según Tabla (5-8) indicada anteriormente.
- Estas láminas de riego corresponden a la cantidad de agua que se debe reponer al sustrato una vez que la humedad de éste llegue al límite establecido como consumo permisible y cuyo valor se mantuvo constante por convenir a los objetivos de la investigación.
- Una vez que la humedad del sustrato llegó al límite de consumo permisible en cada tratamiento, inmediatamente fue repuesta la lámina de agua correspondiente. Para determinar el momento en el que dicha humedad llegaba al límite establecido (momento de riego), de manera simultánea se monitoreó la evapotranspiración, cuyos valores horarios se sincronizaron con las láminas de reposición del sustrato a partir del momento en que se tomaron los registros de humedad del mismo; de esta manera los valores de evapotranspiración se

transformaron a lámina de agua equivalente a la lámina del sustrato. Por lo que para aplicar una nueva lámina de reposición se esperó el momento en que el valor de evapotranspiración se acumulara en los registros de la estación meteorológica hasta igualar la lámina estimada en el sustrato variando el periodo de acumulación en función del tratamiento. Así se estableció un proceso reiterativo durante todo el ciclo fenológico del cultivo. En la Tabla 8 del apéndice I, se muestran los datos de la frecuencia de riegos para el tratamiento uno en tezontle fino.

Tabla 5-9 Cálculo de láminas, frecuencias y tiempos de riego en sustrato de granulometría fina $\phi \leq 2\text{mm}$.

C.C	C.P	$\rho_a \text{ gr/cm}^3$	Prof. Radic	*H.RE	**L.H.R E cm.	***L.R en cm
20.08	17.57	1.23	17	HRE=75%HA	1.574523	0.524841
20.08	14.55	1.23	17	HRE=45%HA	0.943041	1.156323
20.08	11.54	1.23	17	HRE=15%HA	0.31365	1.785714
20.08	10.04	1.23	17	HRE=0%HA	0	2.099364

C.P = Consumo permisible

Tabla 5-9 Continuación

A.C.en cm2	L.H.RE.V(ml)	Q=ml/min	L.R.V(ml)	T.R.hrs y min	FR	Total Rgos
346	544.7849	10	181.5949	18min	3 rgos X dia	369
346	326.2921	10	400.0877	40min	1 rgo X dia	77
346	108.5229	10	617.857044	1hr	1 rgo X 4 dias	31
346	0	10	726.379944	1hr, 13min		

Tabla 5-10 Cálculo de láminas, frecuencias y tiempos de riego en sustrato de granulometría mediana $\phi 2-5\text{mm}$.

C.C	C.P	$\rho_a \text{ gr/cm}^3$	Prof.Radic cm	*H.RE	**L.H.RE cm	***L.R en cm
16.12	14.1	0.67	17	HRE=75%HA	0.687956	0.230078
16.12	11.68	0.67	17	HRE=45%HA	0.412318	0.505716
16.12	9.26	0.67	17	HRE=15%HA	0.13668	0.781354
16.12	8.06	0.67	17	HRE=0%HA	0	0.918034

C.P = Consumo permisible

Tabla 5-10 Continuación

A.C. en cm2	L.H.RE.V(ml)	Q=ml/min	L.R.V(ml)	T.R.hrs y min	FR	Total Rgos
346	238.0327	10	79.606988	8min	7 rgos X dia	796
346	142.662	10	174.662028	14min	2 rgos X dia	170
346	47.2912	10	270.348484	27min	1 rgo X 3 dias	72
346	0	10	317.639764	32min		

Tabla 5-11 Cálculo de láminas, frecuencias y tiempos de riego en sustrato de granulometría gruesa $\phi \geq 5\text{mm}$.

C.C	C.P	$\rho_a \text{ gr/cm}^3$	Prof.Radic	*H.RE	L.H.RE cm.	L.R cm.
14.12	12.35	0.78	17	HRE=75%HA	0.701454	0.234702
14.12	10.23	0.78	17	HRE=45%HA	0.420342	0.515814
14.12	8.11	0.78	17	HRE=15%HA	0.13923	0.796926
14.12	7.06	0.78	17	HRE=0%HA	0	0.936156

C.P = Consumo permisible

Tabla 5-11 Continuación

A.C.en cm ²	L.H.RE.V(ml)	Q=ml/min	L.R.V(ml)	T.R.hrs y min	FR	Total Rgos
346	242.703084	10	81.206892	8min	8 rgos X día	794
346	145.438332	10	178.471644	18	2 rgos X día	169
346	48.17358	10	275.736396	28	1 rgo X 3 días	69
346	0	10	323.909976	33		

Donde:

*H.RE = Humedad Residual en %.

**L.H.RE = Lámina de Humedad Residual en cm.

***L.R = Lámina de Riego en cm.

L.H.RE.V= Lámina de Humedad Residual, en Volumen de agua, en función del área de exposición de los contenedores del sustrato en ml.

L.R.V = Lámina de riego en Volumen de agua, en función del área de exposición de los contenedores del sustrato en ml.

A.C = Área del contenedor (cubeta) en cm^2 .

T.R = Tiempo de riego en horas y minutos.

Q = Gasto de los goteros en ml/minuto.

FR = Frecuencia de Riego.

Nota: en este caso el PMP, se sustituyó por el consumo permisible = C.P

5.10.4. Obtención de calendarios de riego con datos observados

Se calcularon los calendarios de riego para los tres tratamientos de humedad y granulometrías de sustrato considerados: (T1, 75 % hum $\phi \leq 2\text{mm}$), (T4, 45 % hum $\phi \leq 2\text{mm}$) y (T7, 15 % hum $\phi \leq 2\text{mm}$) a través de una muestra inicial de datos observados del experimento, considerando datos de muestreos de alrededor de dos semanas, y a partir de estos valores se calibró el método para la estimación general del momento de riego para el cultivo de jitomate. La obtención de los calendarios de riego se basó en valores de evapotranspiración monitoreados en la estación meteorológica tipo Davis, asociados a datos de temperatura foliar. Los resultados se presentan en forma gráfica en el capítulo de resultados.

5.11. Estrés de la Planta

Para realizar este trabajo se llevó a cabo la medición y registro de variables meteorológicas y fisiotécnicas las que se relacionaron entre sí para estudiar el comportamiento del estrés del cultivo de jitomate cuyo análisis se presenta en el capítulo de resultados. Estas variables fueron: temperatura del aire y de temperatura foliar, radiación solar, evapotranspiración, humedad relativa, peso de materia seca y peso fresco del fruto de jitomate.

5.11.1. Variables meteorológicas registradas

Las variables meteorológicas registradas fueron: temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, evaporación y evapotranspiración. Estas se midieron en tiempo real a excepción de la evaporación, en rangos de ½ hora y manejados en promedios horarios, lo cual se realizó con el apoyo de un dataloger conectado a la estación meteorológica tipo Davis para todas las etapas fenológicas del cultivo. También se midió la temperatura foliar y del aire circundante con termómetro infrarrojo y la humedad del sustrato se midió a través del equipo de TDR (Técnica de Reflectometría Temporal). En la tabla (5-12) se presentan dichas variables meteorológicas, del sustrato y del follaje.

Tabla 5-12 Variables meteorológicas registradas en tiempo real por la estación meteorológica automática tipo Davis, variables del sustrato y del follaje.

VARIABLE	EQUIPO DE MEDICION	HORARIO
Temperatura del aire	Estación Davis Tiempo real	Las 24 h cada ½ hora
Temperatura de la hoja	Termómetro Infrarrojo Modelo 51/52 II	De 8:00 am a 8:00 pm
Humedad Relativa	Estación Davis Tiempo real	Las 24 h cada ½ hora
Humedad del Sustrato	TDR	De 8:00 am a 8:00 pm
Radiación Solar	Estación Davis Tiempo real	Las 24 h cada ½ hora
Evapotranspiración	Estación Davis Tiempo real	Las 24 h cada ½ hora
Monitoreo de Ph y CE.	Medidor Ph Mod. Wd-35607.	Cada tercer día.

5.11.2. Estrés de la planta y variables meteorológicas.

Por cada tratamiento y repetición se tomaron mediciones de la temperatura de la hoja y del aire circundante con termómetro de infrarrojo y sensor de temperatura instalado en la estación automática Davis. Los horarios establecidos para la toma de estos datos fueron: de las 8:00 am a las 8:00 pm, durante la etapa del periodo vegetativo del cultivo y se obtuvieron promedios cada hora. Esta información se utilizó para el diseño de gráficas con las que se observó el comportamiento general de la temperatura foliar respecto a la temperatura del aire, así como del resto de las variables meteorológicas registradas. Sin embargo para analizar el estrés de la planta y en consecuencia estimar el momento de riego, se consideraron principalmente las temperaturas ocurridas en las horas de mayor radiación solar considerando el rango de las 14:00 pm a las 14:30 pm; por lo que las temperaturas foliares registradas correspondientes a cada tratamiento de humedad establecido 75, 45 y 15 % ocurridas en estos horarios se promediaron para eliminar la variabilidad y con este valor promedio de temperaturas foliares y de $(T_a - T_f)$ se generaron modelos lineales para estimar las temperaturas foliares y consecuentemente los porcentajes de humedad de los puntos intermedios del modelo. En las tablas 9,10,11,12 y 13 del apéndice I, se muestran las lecturas de las temperaturas registradas y promediadas ocurridas a las 14:00 pm de la tarde. Se consideró tomar como base para analizar el estrés hídrico de la planta estos horarios de más alta temperatura del aire, debido a que esta regularmente coincide con el momento de mayor evapotranspiración con buenas condiciones de humedad en el sustrato, o baja evapotranspiración si las condiciones de humedad son deficientes y porque de acuerdo con Everest (1982), una causa común de las plantas estresadas es una inadecuada disposición del agua en el suelo; provocando que la planta transpire a una velocidad menor que la demanda evaporativa de la atmósfera y porque el estrés hídrico está basado en el hecho de que la transpiración refresca la hoja cuando el agua es evaporada de la superficie de ésta, y cuando la cantidad de agua se vuelve limitada, la transpiración decrece causando el incremento en la temperatura de la hoja. Al respecto Walker, et., al. 1979 y Jackson, et., al 1977, citados por Moran (2000), indican que: el aumento de los GDD (grados días de desarrollo) prueban que la transpiración y la temperatura del dosel están relacionadas, y que el SDD (Días Grado de Estrés), es la diferencia de las temperaturas de la cobertura vegetal y del aire medidas durante el momento de máximo calor.

5.11.2.1. Variables meteorológicas y temperatura foliar

Con la información meteorológica y fenológica de temperatura del aire y del follaje promediadas (promedio de datos registrados de los tratamientos manejados durante los dos primeros meses del ciclo vegetativo), se realizaron gráficas para estudiar el comportamiento de los datos de temperatura foliar, del aire circundante y de las diferencias entre éstas. También se realizó otra serie de gráficas con los datos de temperatura foliar y del aire circundante para el resto de los tratamientos de humedad y granulometrías considerados para analizar el comportamiento de dichos datos. Figuras (6-9 y 6-10), sección de resultados.

5.11.2.2. Humedad, granulometría y temperatura foliar

Cada uno de los tratamientos de humedad establecidos se probó en tres diferentes granulometrías de sustrato con el fin de comparar y analizar el comportamiento de la temperatura foliar y las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje ($T_a - T_f$) como indicadores de estrés hídrico, así como diferentes porcentajes de humedad establecidos en sustrato con igual diámetro de granulometría.

5.12. Generación de Modelos de Temperatura Foliar

Para generar los valores de temperatura foliar como índices de estrés hídrico planteados inicialmente en los objetivos, como parte de la metodología propuesta por el autor de esta investigación, se establecieron una serie de relaciones entre variables meteorológicas y fenológicas, y se determinaron modelos lineales cuyo poder de predicción y ajuste se estableció a través de los estadísticos de Desviación Absoluta Promedio (DAP) y (r^2), de los cuales se seleccionaron los modelos que presentaron los mejores estadísticos de ajuste a los que se les consideró en este trabajo como **Modelos Base**.

5.12.1. Modelos lineales de temperatura foliar

Para generar estos modelos se relacionaron las temperaturas foliares y las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje ($T_a - T_f$), tomadas con el termómetro de infrarrojo con los porcentajes de déficit de humedad establecidos y controlados con el aparato detector de humedad (TDR) en los horarios indicados anteriormente 14:00 y 14:30 horas respectivamente. A partir de esta relación, se generaron modelos lineales para estimar la “temperatura del follaje” en función del % de déficit de humedad del sustrato. Estimados los valores de temperatura foliar correspondientes a los porcentajes de déficit de humedad establecidos, se generaron también modelos lineales con los que se estimó el % de déficit de humedad del sustrato pero en función de la “temperatura foliar” para cada tratamiento. En el mismo sentido, otro indicador del estrés hídrico considerado fue la diferencia de temperaturas, entre el aire circundante a la hoja y la temperatura propia de la hoja o follaje, por lo que procediendo análogamente, se obtuvieron dichas diferencias para los tratamientos de humedad y granulometrías consideradas, y al igual que en el caso de la temperatura del follaje, dichas diferencias también se relacionaron con los porcentajes de déficit de humedad del sustrato, y también se generaron modelos lineales a través de una regresión, estimándose las diferencias de temperatura que corresponderían a los porcentajes de déficit de humedad del sustrato. En este trabajo, se considero conveniente relacionar la temperatura del follaje con el porcentaje de déficit de humedad del sustrato, en virtud de que dicho déficit representa una forma directa de estimar la lamina de riego que se debe reponer a dicho sustrato en función del indicador de estrés hídrico que puede ser: la temperatura directa de la hoja, o la diferencia de temperaturas entre el aire circundante a la hoja y la temperatura específica de dicha hoja o follaje.

5.12.2. Validación de modelos de Temperatura Foliar

Los modelos lineales generados para estimar los valores de temperatura foliar (T_f) y las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje ($T_a - T_f$) en función del % de déficit de humedad, así como los modelos para estimar el % de déficit de humedad del sustrato en función de la temperatura foliar y de las diferencias de temperatura aire circundante y follaje, se validaron a través de la Desviación Absoluta Promedio (DAP), y del coeficiente de determinación (r^2).

5.13. Desviación Absoluta Promedio (DAP).

Esta prueba estadística (DAP): se define como la sumatoria de los valores absolutos de las diferencias de los valores observados menos los estimados, divididos entre los observados, multiplicados por cien y divididos entre el número de observaciones (N).

El valor del (DAP), indica la discrepancia en % que existe, entre el valor real observado y el valor calculado mediante las ecuaciones estimadas, de tal manera que entre menor sea este índice, mayor será la semejanza entre el valor observado y el calculado.

$$DAP = (1/N) \sum_{i=1}^N \left| (O_i - E) / O_i \right| 100 \dots\dots\dots E C. 3.$$

Donde:

N_i = iésimo número de observaciones.

O_i = iésimo valor observado.

E = Valor estimado.

$\left| (O-E)/O \right|$ = Valor absoluto de las diferencias o desviaciones dividido entre los valores observados.

5.13.1. Cálculo de (DAP) para (Tf) y (Ta-Tf)

Para calcular la desviación Absoluta Promedio en los modelos lineales obtenidos según la ecuación (3), en el caso de los modelos lineales que estiman tanto la temperatura foliar (Tf) como las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf) en función del % de déficit de humedad , se tomaron como valores observados exclusivamente los datos de Tf y (Ta-Tf) registrados y promediados durante los dos primeros meses del periodo vegetativo del cultivo correspondientes a los tratamientos de humedad establecidos y como valores estimados, los datos de Tf y (Ta-Tf) arrojados por los modelos considerando también únicamente los referentes a los tratamientos manejados.

5.13.2. Cálculo de (DAP) para (Ta-Tf)

Para el caso de los modelos que estiman el % de déficit de humedad en función de (Tf) y (Ta-Tf) respectivamente, se tomaron como valores observados los datos registrados referentes a los % de déficit de humedad del sustrato productos de la calibración del TDR, y como valores estimados los datos de % de déficit de humedad del sustrato, obtenidos al evaluar en los modelos para sustrato fino (Modelos Base), los valores estimados de temperatura foliar (Tf) y (Ta-Tf) respectivamente obtenidos de los modelos de sustrato con granulometría mediana y gruesa, Tablas (14 a 16) del anexo de tablas; lo anterior debido a que el manejo del TDR presenta más precisión en sustratos finos. Al evaluar los datos estimados del % de déficit de humedad del sustrato de los modelos de sustratos mediano y grueso en el modelo de sustrato con granulometría fina, al calcular el DAP a estos datos se obtiene la discrepancia de los datos de cada modelo y dicha discrepancia explica la sobreestimación o subestimación de la humedad detectada en el sustrato por el TDR, así como el grado de confiabilidad de los datos obtenidos por los modelos estimados.

5.14.- Temperatura Foliar como Índice de Estrés Hídrico

Las temperatura foliares como índices de estrés hídrico, resultaron de los modelos lineales generados los cuales fueron validados, y cuyos resultados fueron comparados entre sí para determinar la discrepancia entre los datos observados y los resultados estimados, de éstos se seleccionó el modelo que presentó mejor ajuste de acuerdo a los estadísticos señalados anteriormente (Desviación Absoluta Promedio y r^2) y al cual se le denotó como “**Modelo Base**”, por ser el parámetro de evaluación de la temperatura foliar y de (Ta-Tf) que estima de forma directa el porcentaje de humedad en el sustrato.

5.15. Análisis de Variables Fisiotécnicas

Para complementar el análisis sobre la relación de la temperatura foliar y las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (T_a-T_f) con el déficit hídrico del sustrato donde se estableció el cultivo en estudio (jitomate de crecimiento indeterminado), después de estudiar algunas relaciones existentes entre variables meteorológicas y el estrés de la planta, se diseñaron gráficas donde se ilustró el comportamiento de las variables fisiotécnicas obtenidas en esta investigación para evaluar la efectividad de la temperatura foliar y las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (T_a-T_f) como indicadores del estrés hídrico para la determinación del momento u oportunidad de riego respecto del cultivo en cuestión. En las figuras (6-17 a 6-22) de la sección de resultados y Fig. 11 del apéndice II, se muestra el comportamiento de las variables fisiotécnicas mencionadas.

5.15.1. Modelos de rendimiento

Utilizando los datos de temperatura foliar (T_f) y (T_a-T_f) obtenidos de la evaluación de los “modelos lineales base” para sustratos de granulometría fina que mostraron mayor confiabilidad (por las razones descritas en párrafos anteriores) y los valores observados de la variable fisiotécnica “Rendimiento de jitomate”, relacionando ambas variables se generaron dos modelos cuadráticos que estiman el rendimiento del cultivo de jitomate en función de la temperatura foliar señalada, las Figuras 6-22 y 6-23 de la sección de resultados muestran los modelos generados, con su respectivo coeficiente de determinación.

5.15.1.1. Evaluación y validación de modelos de rendimiento

Los modelos de rendimiento de jitomate generados, se evaluaron y validaron considerando los valores de temperatura foliar (T_f) y (T_a-T_f) como índices de estrés obtenidos con los “modelos base” para sustratos con granulometría fina como los índices estimados para sustratos de granulometría mediana y gruesa acotados entre los límites de capacidad de campo y punto de marchitez permanente para observar el comportamiento del rendimiento con respecto a la temperatura foliar.

5.16. Determinación del Momento de Riego

Para determinar el momento de riego se relacionaron los valores de temperatura foliar (T_f) y ($T_a - T_f$) estimados y asumidos como índices de estrés hídrico del cultivo, con los parámetros de % de déficit de humedad del sustrato y rendimiento de jitomate obtenidos en la investigación, tomando en consideración el concepto de consumo mínimo permisible propuesto por USDA el cual indica que se acepta una disminución de 30 a 60 % de la humedad aprovechable para propósitos de buen manejo del riego, de tal forma que con esta relación de variables se establecieron parámetros numéricos de déficit de humedad, temperatura foliar y rendimiento de jitomate que corresponden a la condición indicada de consumo mínimo permisible señalada.

VI.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN:

6.1. Análisis Estadístico de Tratamientos respecto a (Ta-Tf)

Se realizó un análisis de varianza para detectar los efectos o contrastes entre los tratamientos del experimento combinando diámetro de granulometría del sustrato y % de déficit de humedad para la variable de respuesta: diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf). Los datos que alimentaron este análisis corresponden a la serie de muestreos de % de déficit de humedad y diferencias de temperatura del aire y el follaje observadas durante la mayor parte del tiempo que se mantuvo el experimento. Los resultados del análisis de varianza se presentan en la tabla 6-1. En esta tabla se observa que hay efectos significativos de tratamientos con probabilidad de 0.05, ya que (F) calculada es mayor a (F) de tablas. Por lo que se procedió a realizar una prueba de medias para determinar los tratamientos que presentaron diferencias significativas, utilizando el método de la diferencia mínima significativa modificada (DMS).

Tabla 6-1 Análisis de varianza para las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf).

Fuentes de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada
Tratamientos	10	822.88	82.28	342.8
Error	22	5.37	0.24	
Total	32	828.25		
F de tablas	2.297 con $\alpha = 0.05$			

Los resultados de la prueba de medias se presentan en la tabla 6-2. En esta tabla se observa que los contrastes entre los tratamientos T1-T3, T2-T3, T5-T6, T7-T8, T7-T9, T7-T11, T8-T9 y T9-T11 no presentaron diferencias significativas al hacer su respectiva comparación de medias, pero todos los demás tratamientos resultados de la combinatoria del método presentan diferencias significativas unos con otros, (ver tabla 17) del apéndice I. En la tabla (18), también del apéndice I, se presenta la información utilizada para este análisis.

Tabla 6-2 Prueba de medias para diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf).

Comparación de medias de tratamientos (efectos)	
$\bar{T}_i - \bar{T}_j$ (Contrastes)	Intervalo de Confianza
$\bar{T}_1 - \bar{T}_2$	(0.08395859, 3.11604141)**
$\bar{T}_1 - \bar{T}_3$	(-0.31604141, 2.71604141)*
$\bar{T}_1 - \bar{T}_4$	(3.58395859, 6.61604141)**
$\bar{T}_1 - \bar{T}_5$	(5.38395859, 8.41604141)**
$\bar{T}_2 - \bar{T}_3$	(-1.91604141, 1.11604141)*
$\bar{T}_5 - \bar{T}_6$	(-1.11604141, 1.91604141)*
$\bar{T}_7 - \bar{T}_8$	(-0.41604141, 2.61604141)*
$\bar{T}_7 - \bar{T}_9$	(-0.34604141, 2.68604141)*
$\bar{T}_7 - \bar{T}_{11}$	(-0.24604141, 2.78604141)*
$\bar{T}_8 - \bar{T}_9$	(-1.44604141, 1.58604141)*
$\bar{T}_8 - \bar{T}_{11}$	(-1.34604141, 1.68604141)*
$\bar{T}_9 - \bar{T}_{11}$	(-1.41604141, 1.61604141)*
$\bar{T}_{10} - \bar{T}_{11}$	(13.35395859, 16.38604141)**

*No significativo, **Significativo con $\alpha = 0.06$

6.2. Calendarios de Riego

Se calcularon calendarios de riego a través de una muestra inicial de datos observados del experimento, considerando información de muestreos de alrededor de dos semanas, y a partir de estos valores se calibró el método para la estimación general del momento de riego para el cultivo de jitomate. El cálculo de los calendarios de riego se basó en valores monitoreados de evapotranspiración acumulada obtenidos de la estación meteorológica tipo Davis, asociados a datos de temperatura foliar y diferencias de temperatura entre el aire y el follaje de la planta. En las figuras 6-1, 6-2 y 6-3 respectivamente, se presentan los calendarios mencionados así como las frecuencias de riego, asociados con valores específicos de (Ta-Tf) y (Tf) para un periodo de tiempo determinado en los tratamientos de % de déficit de humedad y diámetro de granulometría de sustrato más representativos del trabajo, los cuales fueron: T1, $\phi \leq 2\text{mm}$, T4, $\phi \leq 2\text{mm}$ y T7, $\phi \leq 2\text{mm}$. En las tablas (19, 20 y 21) del apéndice I, se presenta la información con la que se elaboraron los calendarios de riego.

La figura 6-1. Muestra el calendario de riego del tratamiento T1, 75 % humedad residual, $\emptyset \leq 2\text{mm}$ para una lámina de riego de 0.52 cm, asociada a un rango de diferencias de temperatura entre el aire y el follaje de la planta (T_a-T_f) de (11.3 a 11.9) °C y rango de temperatura foliar (T_f) de (23.6 a 25.2)°C, para el periodo de tiempo del 28 de mayo al primero de junio de 2007.

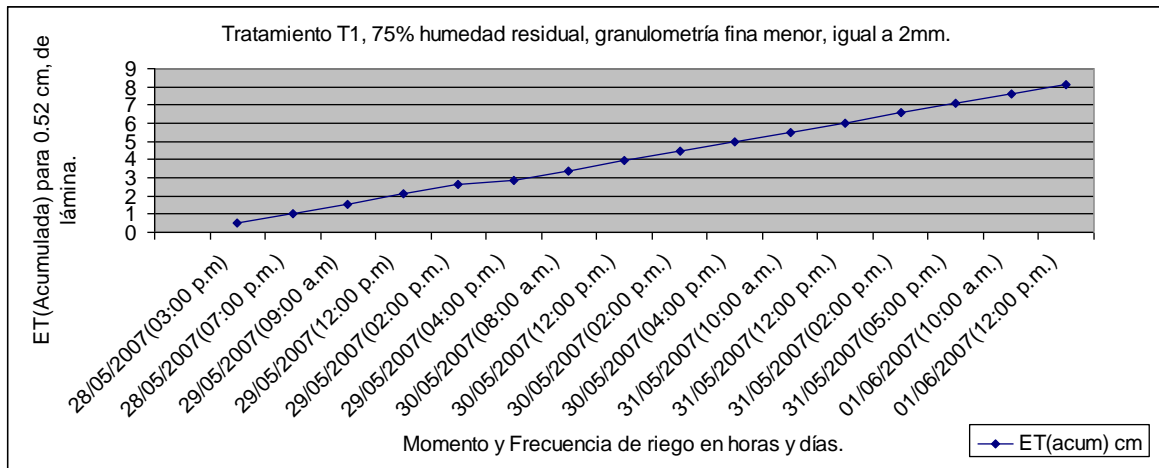


Fig. 6-1. Calendario de riego tratamiento: T1, 75 % humedad residual, para lámina de riego de 0.52 cm con (T_a-T_f) de (11.3 a 11.9) °C y (T_f) de (23.6 a 25.2) °C. Del 28 de mayo al 01 de junio de 2007.

La figura 6-2. Muestra el calendario de riego del tratamiento T4, 45 % humedad residual $\emptyset \leq 2\text{mm}$ para una lámina de riego de 1.15 cm, asociada a un rango de diferencias de temperatura entre el aire y el follaje de la planta (T_a-T_f) de (6.2 a 6.8) °C y rango de temperatura foliar (T_f) de (27.4 a 29)°C, para el periodo de tiempo del 29 de mayo al 18 de junio de 2007.

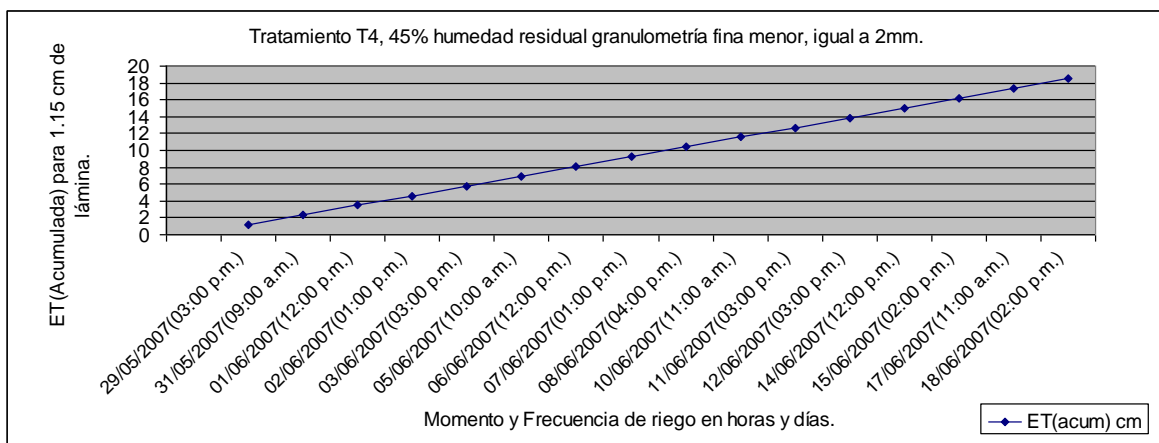


Fig. 6-2. Calendario de riego tratamiento: T4, 45 % humedad residual para lámina de riego de 1.15 cm con (T_a-T_f) de (6.2 a 6.8) °C y (T_f) de (27.4 a 29) °C. Del 29 de mayo al 18 de junio de 2007.

La figura 6-3. Muestra el calendario de riego del tratamiento T7, 15 % humedad residual, $\emptyset \leq 2\text{mm}$ para una lámina de riego de 1.78 cm, asociada a un rango de diferencias de temperatura entre el aire y el follaje de la planta ($T_a - T_f$) de (1.2 a 1.5) °C y rango de temperatura foliar (T_f) de (34.6 a 35.7)°C, para el periodo de tiempo del 31 de mayo al 24 de julio de 2007.

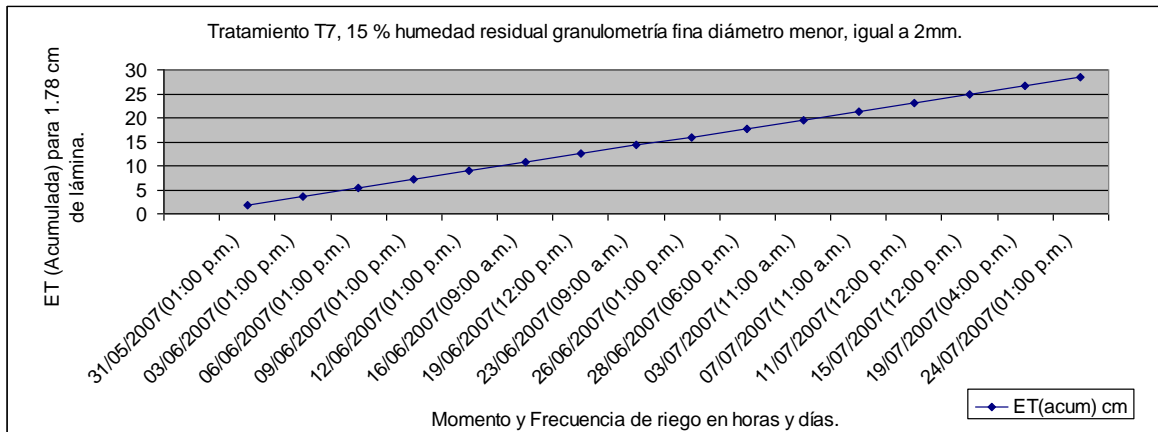


Fig. 6-3. Calendario de riego tratamiento: T7, 15 % humedad residual para lámina de riego de 1.78 cm con ($T_a - T_f$) de (1.2 a 1.5) °C y (T_f) de (34.6 a 35.7) °C. Del 31 de mayo al 24 de julio de 2007.

Las figuras 6-1, 6-2 y 6-3, indican que los riegos se aplicaron cada vez que la evapotranspiración alcanzó valores de 0.52cm, 1.15cm y 1.78cm respectivamente, según el tratamiento de humedad considerado, lo cual constituyó el momento de riego y que la frecuencia de estos riegos varió en función del tiempo que tardó en acumularse dicha evapotranspiración, por lo que de acuerdo a estas figuras, entre más grande es la lámina de riego por aplicar, es menor la frecuencia de riegos, y los intervalos entre éstos son más espaciados.

6.3. Análisis de Variables Meteorológicas

De forma gráfica se analizaron las variables meteorológicas registradas dentro del invernadero durante las etapas de desarrollo del cultivo hasta el momento de la producción. Estas fueron: radiación y energía solar, temperatura del aire, humedad relativa, evaporación y evapotranspiración. Del análisis efectuado sobre el comportamiento de las variables meteorológicas registradas, se observa que existe una relación directamente proporcional entre algunas de ellas siendo el caso de la temperatura del aire, energía solar, evaporación y evapotranspiración, donde al aumentar o disminuir la radiación solar, también aumentan o disminuyen las otras variables, lo cual muestra la dependencia que tienen estas variables respecto a la radiación solar. La Fig. 6-4 muestra el comportamiento típico de las variables meteorológicas registradas dentro del invernadero y la Fig. 1 del anexo de figuras muestra el comportamiento de la evaporación y evapotranspiración respectivamente.

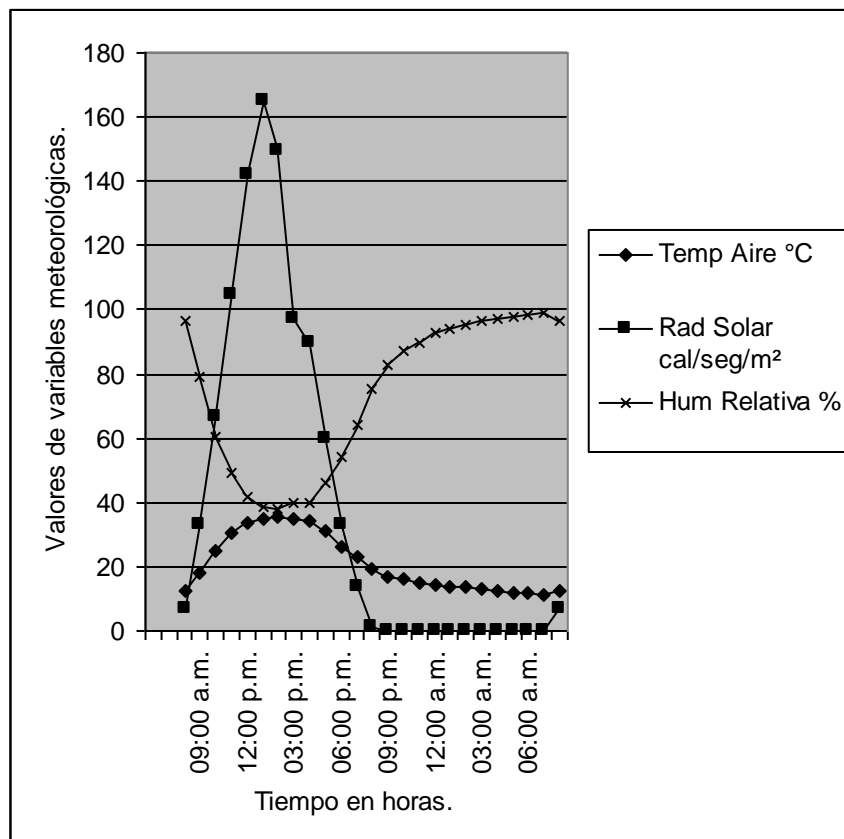


Fig. 6-4 Comportamiento de variables meteorológicas promediadas obtenidas dentro del invernadero

6.3.1. Variables meteorológicas y temperatura foliar.

En relación con las temperaturas del follaje y las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje ($T_a - T_f$) de la planta para los tratamientos de humedad establecidos, se observa que: en el caso de las temperaturas del follaje éstas presentan respuestas semejantes a la influencia de las variables meteorológicas registradas dentro del invernadero, solo que con magnitudes diferentes dependiendo del tratamiento de humedad manejado ya que por ejemplo el tratamiento $T1_{(1,1)}$, cuyo porcentaje de humedad en el sustrato de tezontle con granulometría fina es el más alto, presenta menor aumento en la temperatura del follaje por tener mayor cantidad de humedad en dicho sustrato, mientras que los tratamientos de humedad $T4_{(2,1)}$ y $T7_{(3,1)}$ muestran un mayor aumento en la temperatura foliar lo que se atribuye a su menor cantidad de agua en el sustrato, lo anterior indica que la temperatura de la hoja aumenta o disminuye en forma proporcional a las variables meteorológicas registradas en el invernadero pero su aumento o disminución son proporcionales a la cantidad de humedad acumulada en el sustrato. Para el caso de ($T_a - T_f$) el comportamiento de los datos se presenta de forma inversa al comportamiento gráfico de las temperaturas directas de la hoja o follaje, pues en el caso concreto de las diferencias de temperatura entre el aire circundante a la hoja y la hoja, se observa que el tratamiento con mayor humedad en el sustrato presenta las diferencias de temperatura mas grandes, mientras que los tratamientos con menor cantidad de agua resultan con valores de ($T_a - T_f$) menores, esto indica que entre menor es el valor de ($T_a - T_f$), el estrés hídrico de la planta es mayor, lo que también indica que entre la humedad del sustrato y los valores de ($T_a - T_f$) existe una relación directamente proporcional ya que al disminuir los valores de este índice también disminuye la humedad del sustrato y viceversa, pero a su vez existe una relación inversa entre los valores de ($T_a - T_f$) y el estrés hídrico de la planta dado que al disminuir los valores del mencionado índice aumenta el estrés de la planta. Las Figuras 6-5 y 6-6 muestran las relaciones descritas.

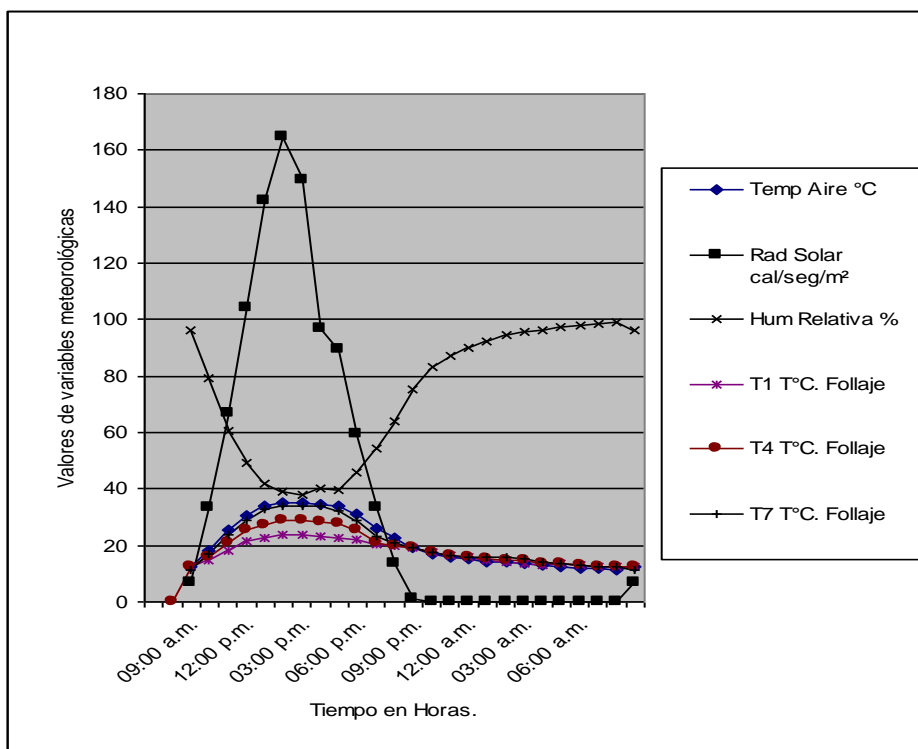


Fig. 6-5 Comportamiento de variables meteorológicas promediadas, registradas dentro del invernadero en relación con temperaturas foliares para tratamientos de humedad en tezontle fino diámetro menor, igual a 2 mm

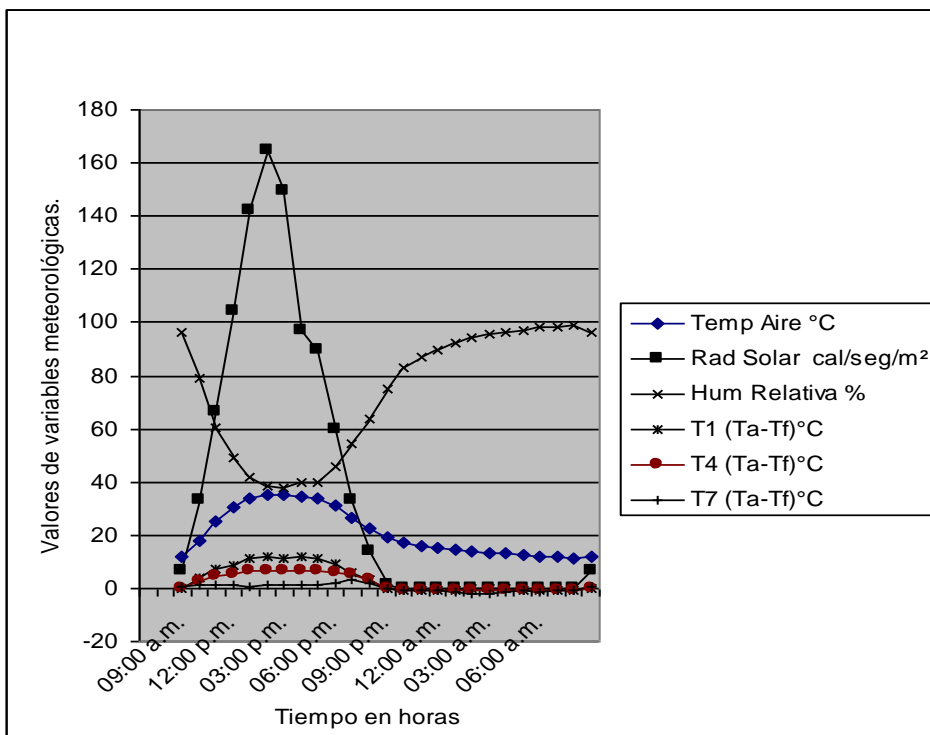


Fig. 6-6 Comportamiento de variables meteorológicas, registradas dentro del invernadero en relación con diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf) para tratamientos de humedad en tezontle fino, diámetro menor, igual a 2 mm

6.4. Humedad del Sustrato y Temperatura Foliar

Al analizar el comportamiento de la temperatura foliar de los tres tratamientos de humedad establecidos (T1=100-75% , T4=100-45% y T7=100-15% de humedad respectivamente), para el diámetro de sustrato ($\varnothing \leq 2\text{mm}$), y al comparar dichas temperaturas foliares con la temperatura del aire se observa que a medida que el porcentaje de humedad del sustrato es más alta la temperatura foliar es mas baja, de igual manera para un porcentaje de humedad baja, la temperatura foliar es más alta al grado de que entre menor es el porcentaje de humedad de dicho sustrato , la temperatura foliar de ese tratamiento tiende a igualar, incluso a sobrepasar en un momento dado a la temperatura del aire circundante al follaje de la planta. La Fig. 6-7 muestra el comportamiento de la temperatura del follaje respecto a la del aire circundante para cinco tratamientos de humedad, pero manejados en sustrato de tezontle con granulometría fina. Las tablas 2 y (22) del apéndice I, presentan los datos promedio de temperatura foliar y del aire para todo el ciclo del cultivo, así como los datos de temperatura de los tratamientos de humedad extrema con los que se realizó la gráfica de la figura (6-7).

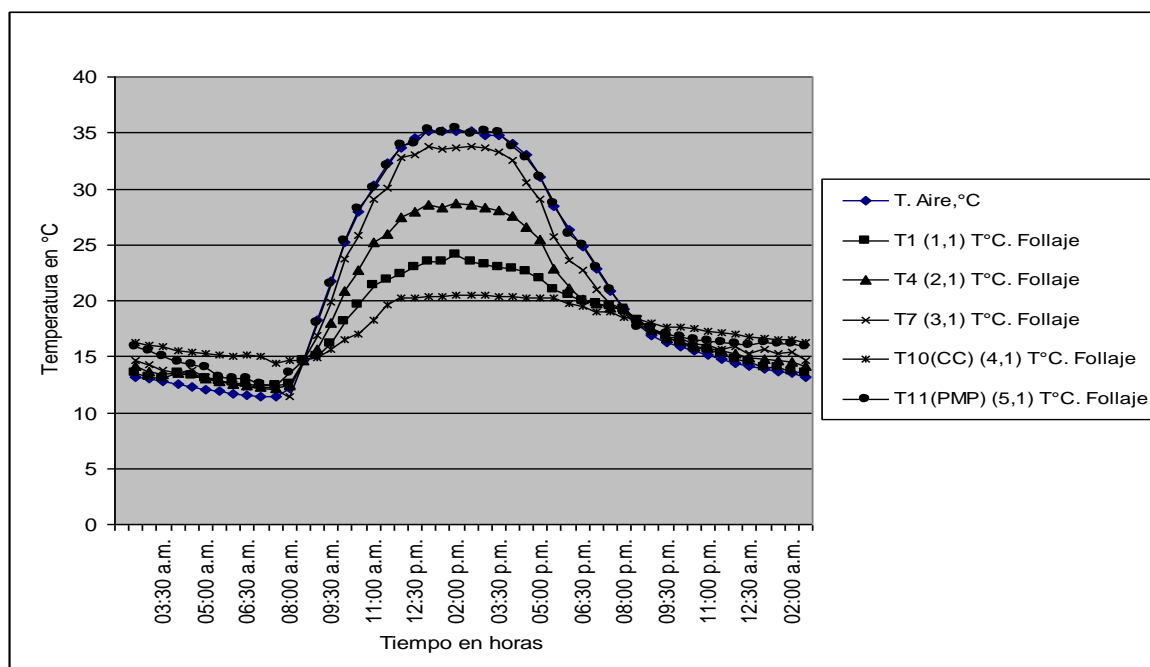


Fig. 6-7 Temperaturas del aire y follaje para cinco tratamientos con 75, 45, 15, 100 a 95 y 10 a 5 % de humedad residual en sustrato fino, diámetro de granulometría menor, igual a 2 mm. Datos promedio de todo el ciclo del cultivo.

Nota: Los números entre paréntesis significan: % de humedad y diámetro de granulometría respectivamente.

6.4.1. Granulometrías y temperatura foliar

Al analizar los datos registrados de la temperatura foliar en los tratamientos manejados se observa en primer lugar que existen diferencias marcadas en las temperaturas foliares entre tratamientos con diferente cantidad de humedad y en segundo lugar, se observa que un mismo tratamiento de humedad manejado con los tres diámetros de granulometría diferentes, presenta pequeñas diferencias de temperatura foliar. Particularmente se observa que aunque estas diferencias son pequeñas, un mismo tratamiento de humedad presenta temperaturas foliares más altas para los sustratos con diámetros de granulometría más gruesas. Lo anterior indica que de los tres diámetros de granulometrías de sustrato manejados, el más adecuado para determinar el estrés hídrico en función de la temperatura foliar es el sustrato fino ($\emptyset \leq 2\text{mm}$), Figs. 6-8 y 6-9.

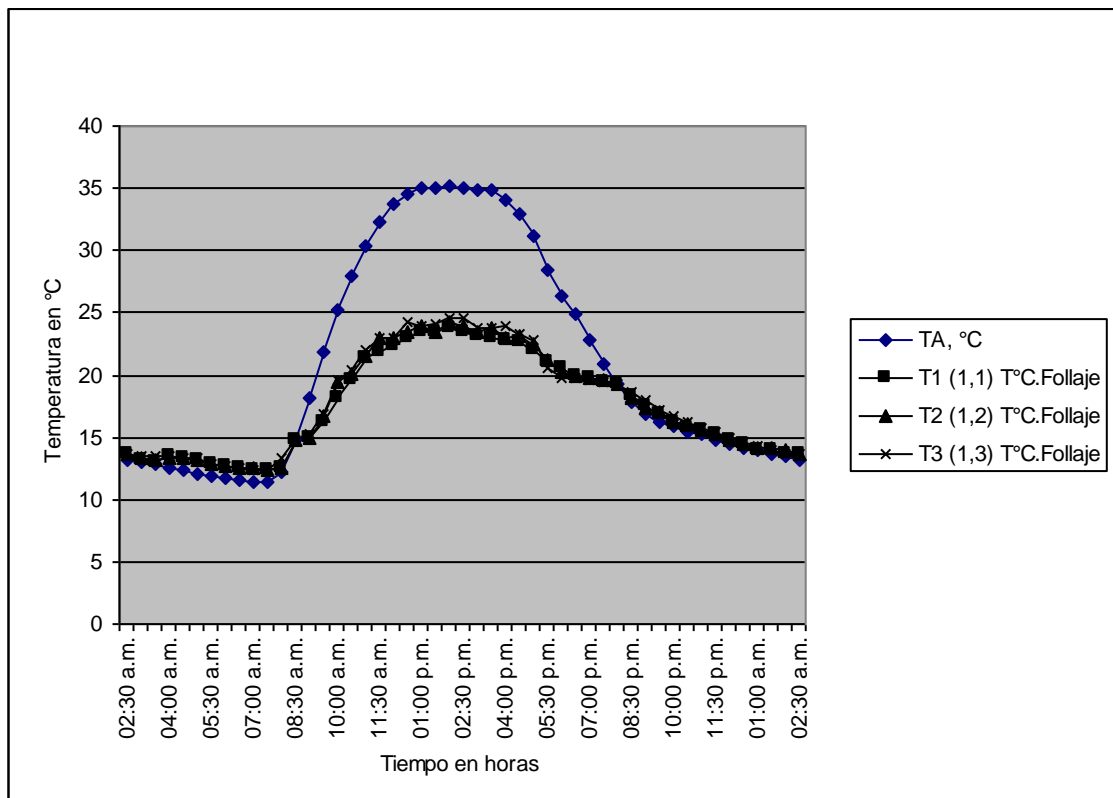


Fig. 6-8 Temperaturas del aire y follaje para tres repeticiones del tratamiento con 75% de humedad residual, y diferentes diámetros de granulometrías del sustrato

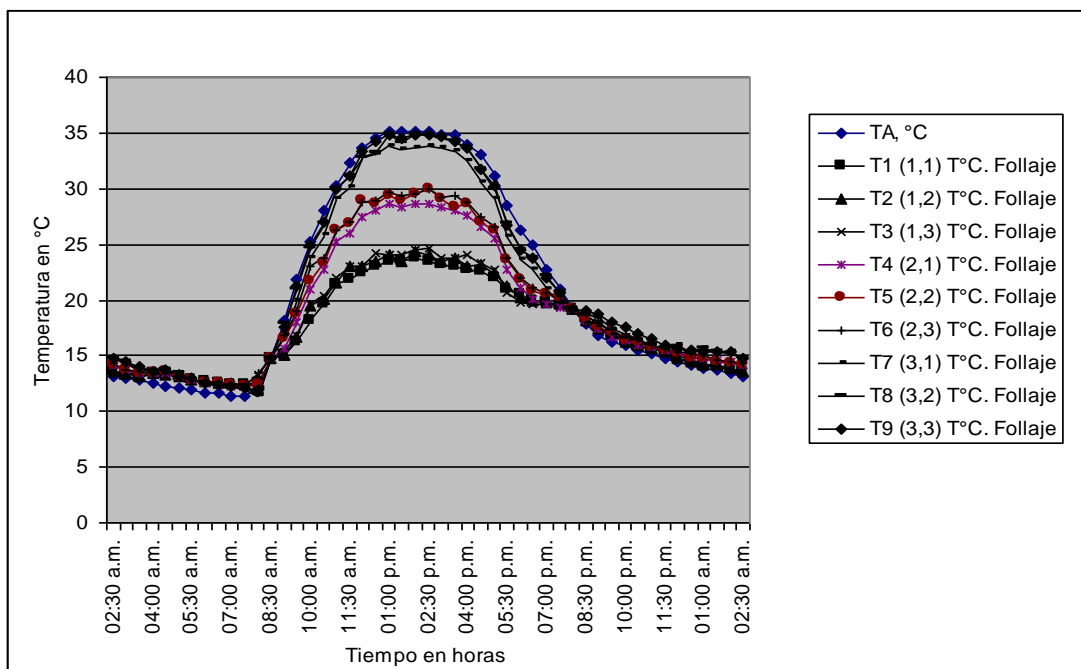


Fig 6-9 Comparación de temperaturas del aire y follaje para tres tratamientos con 75, 45 y 15 % de humedad residual con diferentes granulometrías de sustrato

Nota: Los números entre paréntesis significan: % de humedad y diámetro de granulometría respectivamente.

6.4.2. Granulometrías y diferencias de temperatura (Ta-Tf).

Del análisis de las granulometrías y las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje se observa un comportamiento similar, pero inverso al de la temperatura foliar directa, puesto que para las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje respecto a los tratamientos de humedad establecidos en tezontle con granulometría fina, el tratamiento uno con mayor humedad en el sustrato presenta las (Ta-Tf) más grandes, y los tratamientos cuatro y siete con menor porcentaje de humedad muestran los valores de (Ta-Tf) más pequeños, lo cual indica que entre mas grande es la diferencia de temperaturas entre el aire circundante y el follaje medido con termómetro infrarrojo, mayor es la humedad presente en el sustrato y valores pequeños de este índice representan porcentajes de humedad bajos en el sustrato de la planta (Fig. 6-10). De igual forma al analizar en forma conjunta el comportamiento de estas diferencias de temperatura para todos los tratamientos de humedad y todas los diámetros de granulometrías manejadas, se observan variaciones en el índice (Ta-Tf) para un mismo tratamiento de humedad pero en sustratos con diferente textura, lo anterior se ilustra en la Fig. (6-11), y en la tabla (23) del apéndice I, se presentan los datos promedio de temperatura del aire y de (Ta-Tf) para tratamientos de humedad extrema para todo el ciclo del cultivo con los que se elaboraron las gráficas de las figuras 6-10 y 6-11.

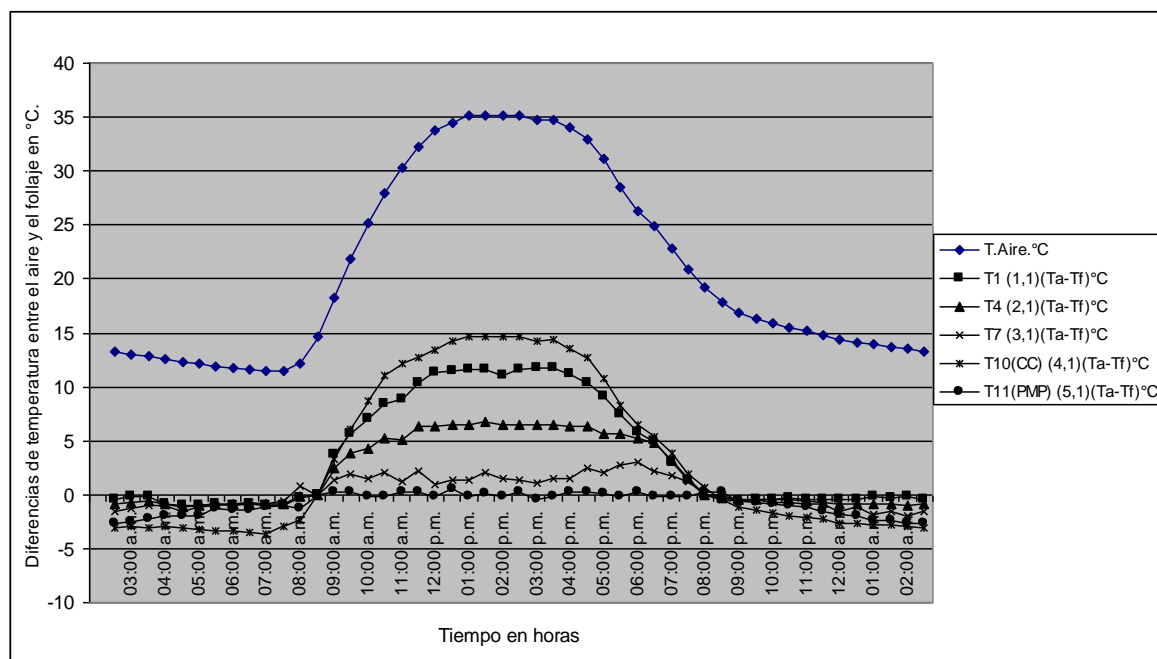


Fig. 6-10 Diferencias de temperatura entre el aire y el follaje para cinco tratamientos con 75, 45, 15, 100 a 95 y 10 a 5 % de humedad residual en tezontle con granulometría fina diámetro menor, igual a 2 mm.

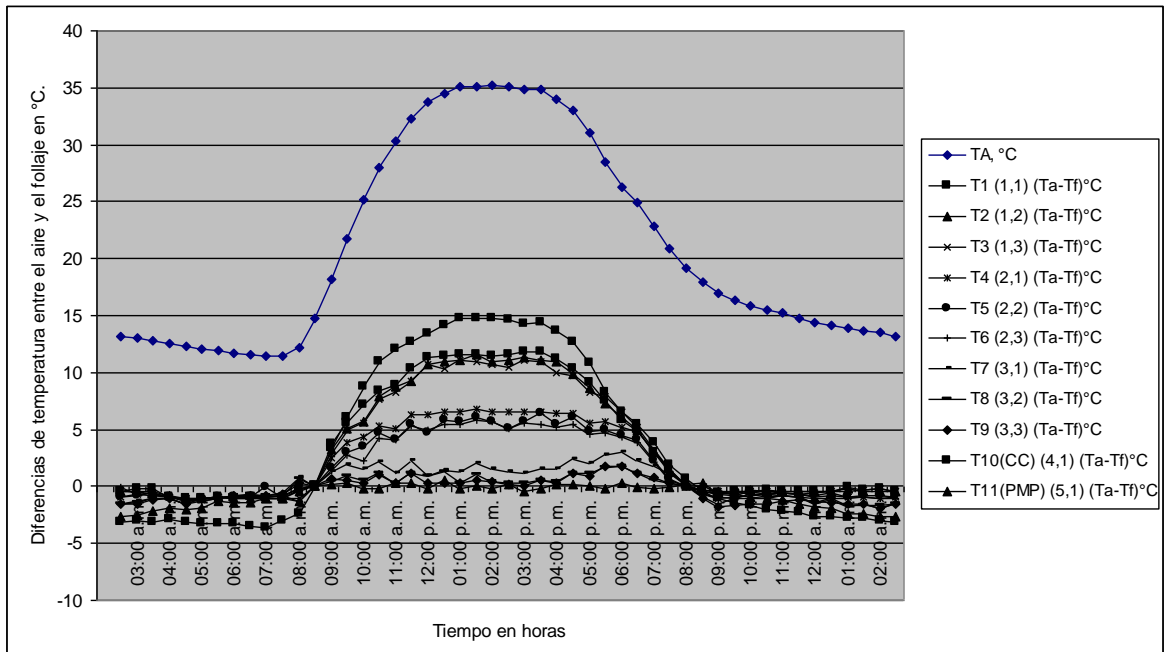


Fig. 6-11 Comparación de diferencias de temperatura entre el aire y el follaje para tres tratamientos y tres repeticiones con 75, 45 y 15 % de humedad residual con diferente granulometría del sustrato, respecto a tratamientos de humedad extrema (CC y PMP), con 100 a 95 y 10 a 5 % de humedad residual respectivamente.

6.5. Estimación de la Temperatura Foliar como Índice de Estrés Hídrico

6.5.1. Modelos lineales de temperatura foliar.

Las Tablas 6-3 y 6-4 muestran los modelos lineales generados que estiman la temperatura foliar como índice de estrés hídrico, en función del porcentaje de déficit de humedad del sustrato. Las Tablas 6-5 y 6-6 muestran los modelos que estiman el % de déficit de humedad en función de la temperatura foliar y diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf) respectivamente para tres diámetros de granulometría. De acuerdo a éstos modelos, cada uno de los valores de temperatura foliar y de (Ta-Tf) representan indicadores de estrés hídrico al estar relacionados con un nivel específico de déficit de humedad en el sustrato. De acuerdo a las estadísticas inherentes a los modelos generados para sustratos con granulometría fina tanto para los valores de temperatura foliar como para los valores de (Ta-Tf) se observa que éstos presentan mejores ajustes que los modelos generados para sustratos con diámetros de granulometría mediana y gruesa (r^2)= 0.99 y 0.99, así como desviación absoluta promedio (DAP) = 0.64 y 8.1 consecutivamente, en las figuras (5 a 8) del apéndice II, se muestran sus gráficas correspondientes.

Tabla 6-3 Modelos lineales generados que estiman la temperatura foliar en función del % de déficit de humedad, en tres diámetros de granulometría de sustrato

Temperatura foliar en función del % de déficit de humedad			
Ø de granulometría	Modelo lineal	R²	DAP = (1/N) ∑ (O-E)/O 100
Ø ≤ 2mm	Y= 0.1525X+20.418	0.99	0.64
Ø 2-5mm	Y= 0.175X+20.075	0.99	0.79
Ø ≥ 5mm	Y= 0.1717X+20.292	0.97	0.85

Donde:

Y = Temperatura foliar en °C.

X = % de déficit de humedad del sustrato.

Nota: el rango de temperatura está limitado por CC y PMP. Donde

CC = % de humedad a capacidad de campo.

PMP = % de humedad a punto de marchitez permanente|

Tabla 6-4 Modelos lineales generados que estiman las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf) en función del % de déficit de humedad, en tres diámetros de granulometría de sustrato

(Ta-Tf) en función del % de déficit de humedad			
Ø de granulometría	Modelo lineal	R²	DAP = (1/N) ∑ (O-E)/O 100
Ø ≤ 2mm	Y= -0.1555X+15.141	0.99	8.1
Ø 2-5mm	Y= -0.1617X+13.892	0.99	13.57
Ø ≥ 5mm	Y= -0.17X+14.217	0.98	39.85

Donde:

Y = (TA-TF) = Diferencias de temperatura entre el aire y el follaje.

X = % de déficit de humedad del sustrato.

Nota: El rango de humedad del sustrato está desde cero hasta 100%.

Tabla 6-5 Modelos lineales generados que estiman el % de déficit de humedad, en función de la temperatura foliar en tres diámetros de granulometría de sustrato

% de déficit de humedad en función de la temperatura foliar			
Ø de granulometría	Modelo lineal	R²	DAP = (1/N) ∑ (O-E)/O 100
Ø ≤ 2mm	Y= 6.5462X-133.76	0.99	0.22
Ø 2-5mm	Y= 5.7003X-114.3	0.99	10.13
Ø ≥ 5mm	Y= 5.827X-118.29	0.97	10.65

Donde:

X = Temperatura foliar en °C.

Y = % de déficit de humedad del sustrato.

Nota: el rango de temperatura está limitado por CC y PMP. Donde:

CC = % de humedad a capacidad de campo.

PMP = % de humedad a punto de marchitez permanente

Tabla 6-6 Modelos lineales generados que estiman el % de déficit de humedad, en función de las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf) en tres diámetros de granulometría de sustrato

% de déficit de humedad en función de (Ta-Tf)			
Ø de granulometría	Modelo lineal	R²	DAP = (1/N) ∑ (O-E)/O 100
Ø ≤ 2mm	Y= -6.4084X+97.21	0.99	0.34
Ø 2-5mm	Y= -6.1679X+85.839	0.99	22.13
Ø ≥ 5mm	Y= -5.8079X+83.265	0.98	22.77

Donde:

X = (Ta-Tf) = Diferencias de temperatura entre el aire y el follaje.

Y = % de déficit de humedad del sustrato.

Nota: El rango de humedad del sustrato está desde cero hasta 100%.

6.5.2. Temperaturas foliares generadas como índices de estrés hídrico

Al analizar las temperaturas foliares y las lecturas de $(T_a - T_f)$ registradas y consecuentemente las estimadas con los modelos respectivos sobre todo para los tratamientos de “granulometrías mediana y gruesa”, se observa que no corresponden al porcentaje de déficit de humedad que supuestamente deberían tener, lo que indica que los tratamientos de granulometrías mediana y gruesa contienen menor humedad, esto se comprobó al comparar dichas temperaturas foliares con el porcentaje de déficit de humedad que se manejó en los tres tratamientos con diámetros de granulometría diferentes, pues las temperaturas foliares resultan más bajas para el caso del tratamiento con granulometría más fina y más altas para los tratamientos con granulometrías más gruesas, lo mismo ocurre para $(T_a - T_f)$ pero en forma inversa donde el tratamiento de granulometría más fina presenta las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje más altas y los tratamientos con granulometrías mediana y gruesa presentan valores de este índice $(T_a - T_f)$ menores. Las tablas 6-7 y 6-8 y Figuras 6-12 y 6-13 muestran las temperaturas foliares generadas (T_f) y $(T_a - T_f)$ así como las comparaciones entre éstos.

Tabla 6-7 Valores de temperatura foliar, estimados para tres diámetros de granulometría de sustrato en función del porcentaje de déficit de humedad

	$T_f = 0.1525(\%DHS) + 20.418$	$T_f = 0.175(\%DHS) + 20.075$	$T_f = 0.1717(\%DHS) + 20.292$
	$\varnothing \leq 2\text{mm}$	$\varnothing 2 \text{ a } 5\text{mm}$	$\varnothing \geq 5\text{mm}$
% Déficit Humedad	T°C. Follaje	T°C. Follaje	T°C. Follaje
De Calibración	Estimada	Estimada	Estimada
100	35.7	37.6	37.5
95	34.9	36.7	36.6
90	34.1	35.8	35.7
85	33.4	35	34.9
80	32.6	34.1	34
75	31.9	33.2	33.2
70	31.1	32.3	32.3
65	30.3	31.5	31.5
60	29.6	30.6	30.6
55	28.8	29.7	29.7
50	28	28.8	28.9
45	27.3	28	28
40	26.5	27.1	27.2
35	25.8	26.2	26.3
30	25	25.3	25.4
25	24.2	24.5	24.6
20	23.5	23.6	23.7
15	22.7	22.7	22.9
10	21.9	21.8	22
5	21.2	21	21.2
0	20.4	20.1	20.3

Donde: Y= Temperatura foliar (Tf)

X= % de déficit de humedad del sustrato (%DHS)

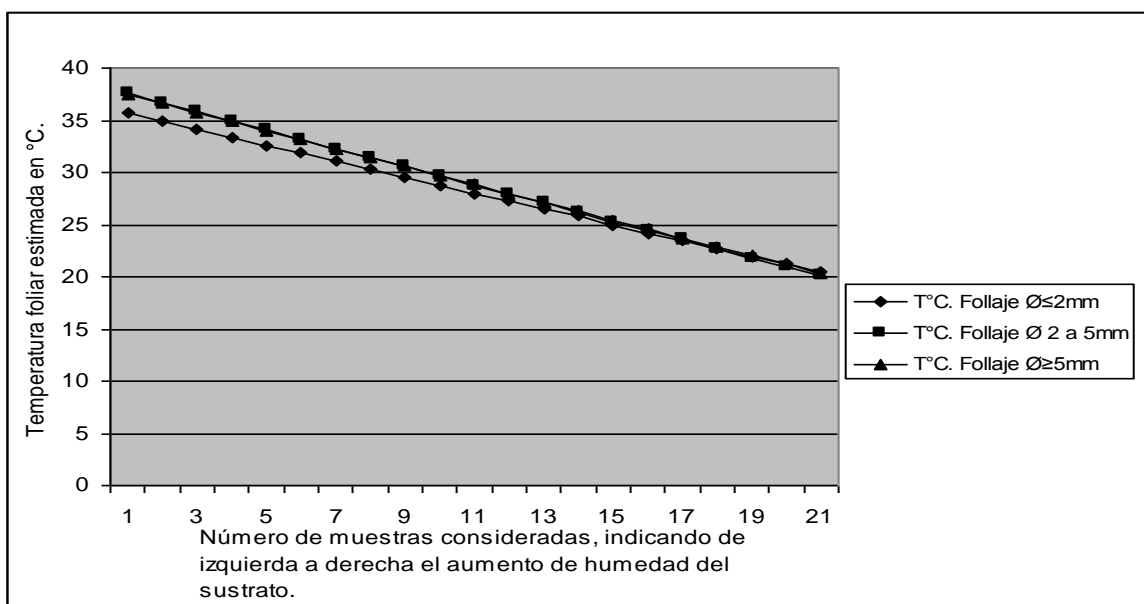


Fig. 6-12 Comparación de valores de temperatura foliar, estimados por modelos generados, para porcentajes de déficit de humedad y diferentes granulometrías de sustrato

Nota: Número de muestras, se refiere al número progresivo asignado a cada muestra de humedad del sustrato en la calibración inicial del TDR.

En la figura 6-12, se comparan los valores de temperatura foliar estimados (Tf) en función del % de déficit de humedad para los tres diámetros de sustrato manejados, en esta figura se observa que el tratamiento de humedad para granulometría fina presenta los valores de temperatura foliar por debajo de los valores correspondientes a los resultantes de tratamientos de sustrato mediano y grueso, lo que sugiere que en estos últimos tratamientos los porcentajes de déficit de humedad de los sustratos existe una sobreestimación.

Tabla 6-8 Valores de diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf) estimados para tres diámetros de granulometría de sustrato en función del % de déficit de humedad

	$(Ta-Tf) = -0.1555(\%DHS)+15.141$	$(Ta-Tf) = -0.1617(\%DHS)+13.892$	$(Ta-Tf) = -0.17(\%DHS)+14.217$
	$\varnothing \leq 2mm$	$\varnothing 2 a 5mm$	$\varnothing \geq 5mm$
% Déficit Humedad	(TA-TF)°C	(TA-TF)°C	(TA-TF)°C
De calibración	estimada	estimada	estimada
100	0.1	-2.3	-2.8
95	0.4	-1.5	-1.9
90	1.1	-0.7	-1.1
85	1.9	0.2	0.2
80	2.7	1	0.6
75	3.5	1.8	1.5
70	4.3	2.6	2.3
65	5	3.4	3.2
60	5.8	4.2	4
55	6.6	5	4.9
50	7.4	5.8	5.7
45	8.1	6.6	6.6
40	8.9	7.4	7.4
35	9.7	8.2	8.3
30	10.5	9	9.1
25	11.3	9.9	10
20	12	10.7	10.8
15	12.8	11.5	11.7
10	13.6	12.3	12.5
5	14.4	13.1	13.4
0	15.1	13.9	14.2

Donde: Y= Diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf)
X= % de déficit de humedad del sustrato (%DHS)

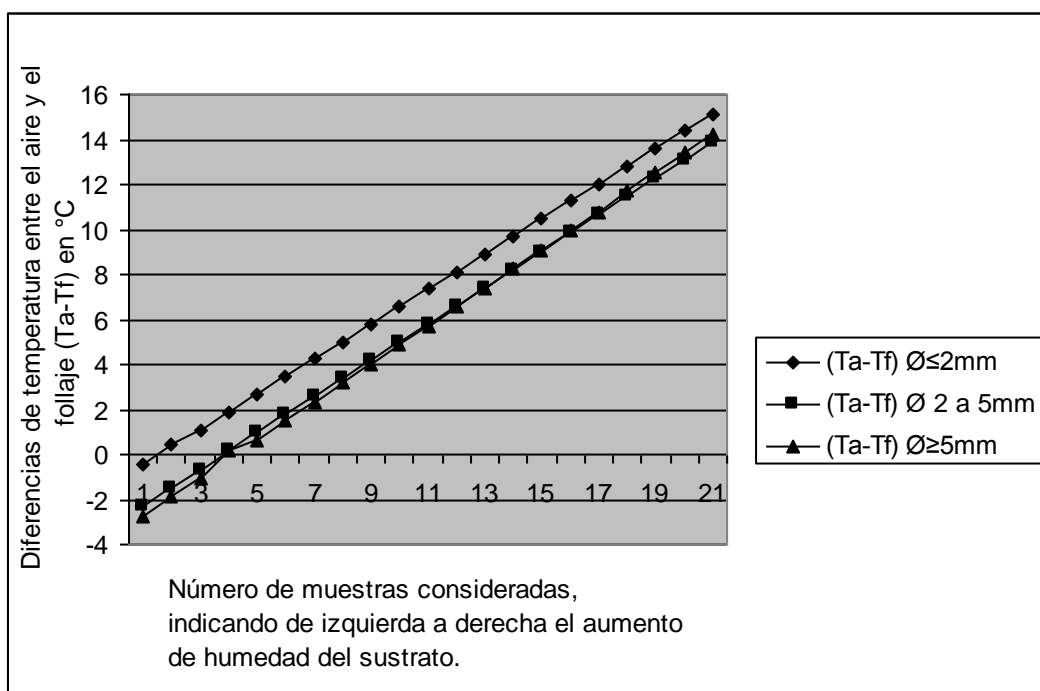


Fig. 6-13 Comparación de valores de diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf), estimados por modelos generados, para porcentajes de déficit de humedad y diferentes granulometrías de sustrato

En la figura 6-13, se comparan los valores de las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf) estimados en función del % de déficit de humedad para los tres diámetros de sustrato manejados, en esta figura se observa que el tratamiento de humedad para granulometría fina presenta los valores de (Ta-Tf) por arriba de los valores correspondientes a los resultantes de tratamientos de sustrato mediano y grueso, lo que al igual que en el caso de los valores estimados de temperatura foliar (Tf) sugiere que en estos últimos tratamientos los porcentajes de déficit de humedad de los sustratos también presentan sobreestimación,

6.5.2.1. Evaluación y validación de modelos de temperatura foliar

En virtud de que se observó mayor ajuste en los modelos que estiman la temperatura foliar (T_f) y ($T_a - T_f$) en función del % de déficit de humedad para sustratos de granulometría fina, y por presentar coeficientes de determinación más altos, y valores más bajos en cuanto a desviación absoluta promedio, se asumieron éstos como **“modelos base”** para evaluar los valores de temperatura foliar (T_f) y ($T_a - T_f$), como índices de estrés hídrico utilizando incluso aquellos valores de temperatura foliar que fueron estimados por el resto de los modelos, para determinar el porcentaje de déficit de humedad de los sustratos mediano y grueso. Al respecto, en la evaluación realizada, se observan discrepancias del % de déficit de humedad entre tratamientos en función de su diámetro de granulometría, resaltando que entre más grueso es el sustrato, mayor es el déficit de humedad observado, por lo que los tratamientos con granulometría más fina resultan con menor déficit de humedad. Tablas 6-9 y 6-10 y Figuras 6-14 y 6-15.

La tabla 6-9, muestra la comparación de los valores de % de déficit de humedad estimados al evaluar en el modelo base de sustrato fino los valores de temperatura foliar (T_f) considerados como índices de estrés, obtenidos de los modelos de sustrato mediano y grueso con los valores de % de déficit de humedad observados y estimados con aparato detector de humedad de sustrato (TDR). La Tabla 6-10 muestra la comparación de los valores de % de déficit de humedad estimados al evaluar en el modelo base de sustrato fino los valores de las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje ($T_a - T_f$) obtenidos de los modelos de sustrato mediano y grueso con los valores de % de déficit de humedad observados y estimados con aparato detector de humedad de sustrato (TDR).

Tabla 6-9 Comparación de porcentajes de déficit de humedad, estimados con modelo base y temperatura foliar para tratamientos con diámetro de granulometría diferente

(Modelo base) Sustrato fino %DHS=6.5462(Tf)-133.76			
	Ø ≤ 2mm	Ø 2 a 5mm	Ø ≥ 5mm
%Déficit Humedad	*%Déficit Humedad	*%Déficit Humedad	*%Déficit Humedad
De Calibración	Estimado	Estimado	Estimado
100	100.2	112.6	112.0
95	94.9	106.7	106.1
90	89.7	100.8	100.2
85	85.1	95.6	94.9
80	79.9	89.7	89.0
75	75.3	83.8	83.8
70	70.0	77.9	77.9
65	64.8	72.7	72.7
60	60.2	66.8	66.8
55	55.0	60.9	60.9
50	49.7	55.0	55.6
45	45.1	49.7	49.7
40	39.9	43.8	44.5
35	35.3	37.9	38.6
30	30.1	32.0	32.7
25	24.8	26.8	27.4
20	20.2	20.9	21.5
15	15.0	15.0	16.3
10	9.7	9.1	10.4
5	5.2	3.9	5.2
0	0.1	-2.0	-0.7

Donde: Y= % de déficit de humedad en el sustrato (%DHS).
X= Temperatura foliar (Tf).

Nota: Los valores de temperatura foliar (Tf) evaluados en la ecuación: %DHS = 6.5462(Tf)-133.76, corresponden a los valores de temperatura foliar estimados con los modelos $Tf = 1525(\%DHS)+20.418$, $Tf = 0.175(\%DHS) +20.075$ y $Tf = 0.1717(\%DHS) +20292$ presentados en la anterior tabla 6-7.

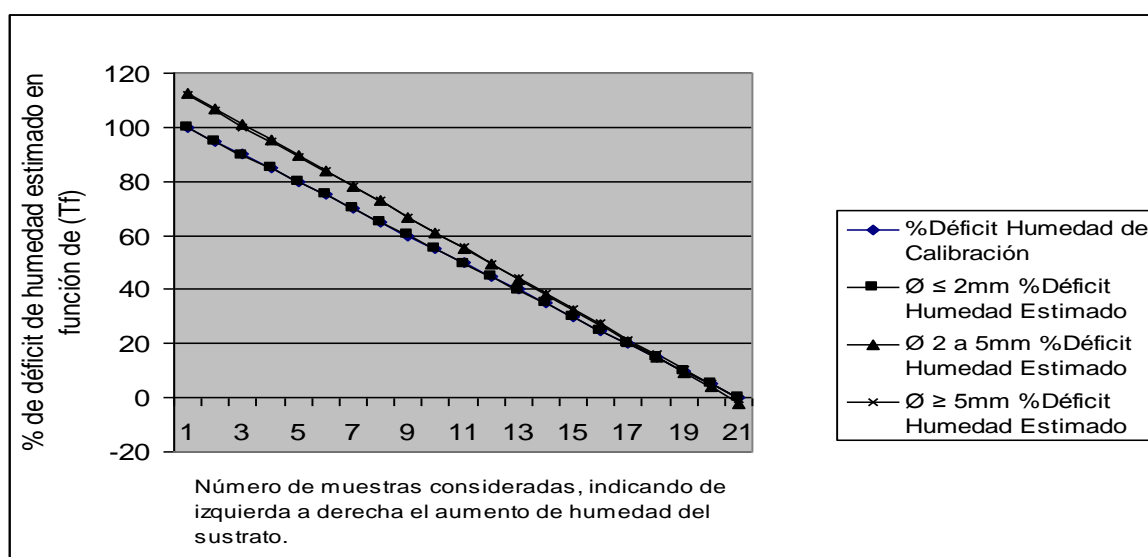


Fig. 6-14 Comparación de porcentajes de déficit de humedad, estimados con modelo base en función de la temperatura foliar (Tf) en diferentes granulometrías de sustrato

Nota: Número de muestras, se refiere al número progresivo asignado a cada muestra de humedad del sustrato en la calibración inicial del TDR.

Tabla 6-10 Comparación de porcentajes de déficit de humedad, estimados con modelo base y diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf) para tratamientos con diámetro de granulometría diferente

(Modelo base) Sustrato fino %DHS = -6.4084(Ta-Tf)+97.21			
	Ø ≤ 2mm	Ø 2 a 5mm	Ø ≥ 5mm
% Déficit Humedad De Calibración	% Déficit Humedad Estimado	% Déficit Humedad Estimado	% Déficit Humedad Estimado
100	99.9	112.2	115.4
95	94.8	107	109.6
90	90.3	101.9	104.4
85	85.2	96.1	98.7
80	80	90.9	93.5
75	74.9	85.8	87.7
70	69.7	80.7	82.6
65	65.2	75.5	76.8
60	60.1	70.4	71.6
55	54.9	65.2	65.9
50	49.8	60.1	60.7
45	45.3	54.9	54.9
40	40.1	49.8	49.8
35	35	44.6	44
30	29.9	39.5	38.9
25	24.7	33.7	33.1
20	20.2	28.6	27.9
15	15.1	23.4	22.1
10	9.9	18.3	17
5	4.8	13.1	11.2
0.3	0.3	8	6.1

Donde: Y= % de déficit de humedad en el sustrato (%DHS).

X= Diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf).

Nota: Los valores de temperatura foliar (Ta-Tf) evaluados en la ecuación: %DHS = -6.4084(Ta-Tf)+97.21, corresponden a los valores de (Ta-Tf) estimados con los modelos: (Ta-Tf) = -0.1555(%DHS)+15.141, (Ta-Tf) = -0.1617(%DHS)+13.892 y (Ta-Tf) = -0.17(%DHS)+14.217 presentados en la anterior tabla 6-8.

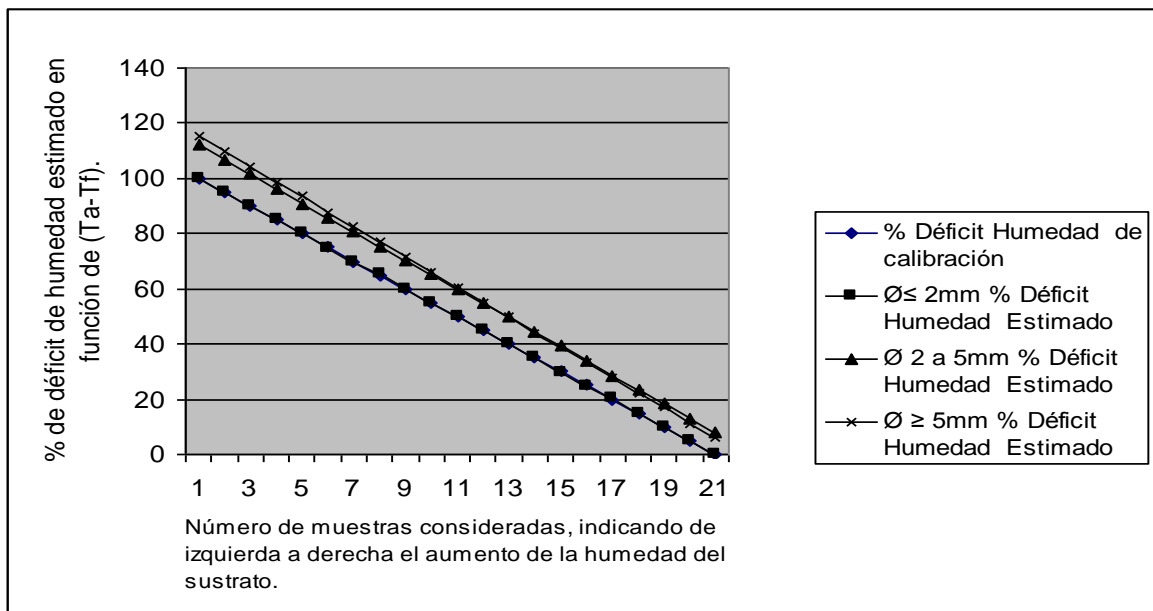


Fig. 6-15 Comparación de porcentajes de déficit de humedad, estimados con modelo base en función de las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf) en diferentes granulometrías de sustrato

En las figuras 6-14 y 6-15 correspondientes a los tratamientos de % de déficit de humedad a los que se les suministró la misma cantidad de agua, se observa que las gráficas de los sustratos mediano y grueso, se encuentran por encima de la gráfica del tratamiento de sustrato fino, lo que indica que los sustratos de granulometría mediana y gruesa contienen menor humedad y en consecuencia mayor déficit de agua respecto al tratamiento de humedad con granulometría fina. También se observa que los valores de % de déficit de humedad estimados del tratamiento con sustrato fino, para el caso de de la temperatura foliar (T_f) y ($T_a - T_f$) presentan valores muy próximos a los valores calibrados a través del aparato registrador de humedad del sustrato (TDR).

6.6. Análisis de Variables Fisiotécnicas

Para investigar el efecto del déficit hídrico en el desarrollo del cultivo de jitomate y su relación con la temperatura foliar, se analizaron los resultados de desarrollo y rendimiento con relación a algunas variables fisiotécnicas involucradas en esta investigación, considerando el promedio de tres cortes. En las figuras 6-16, 6-17, 6-18 y 6-19, se muestran graficados los resultados obtenidos de las variables: biomasa acumulada total, materia seca acumulada total, área foliar total y rendimiento total de jitomate respectivamente, para tratamientos de humedad y granulometrías de sustrato comparadas con tratamientos de humedad extrema (capacidad de campo y punto de marchitez permanente), y la figura (11) del apéndice II, presenta la variable longitud de raíces donde se observó que ésta fue la única variable fisiotécnica cuyo comportamiento fue inverso a los tratamientos de humedad y granulometrías de sustrato, ya que los valores más altos de esta variable se presentaron para tratamientos de baja humedad, alto déficit hídrico y altas temperaturas foliares, y cuyo comportamiento puede deberse a que al no contar con suficiente humedad el sustrato, la planta se ve en la necesidad de buscarla, para lo cual extiende sus raíces hasta el sitio donde esta humedad pueda existir.

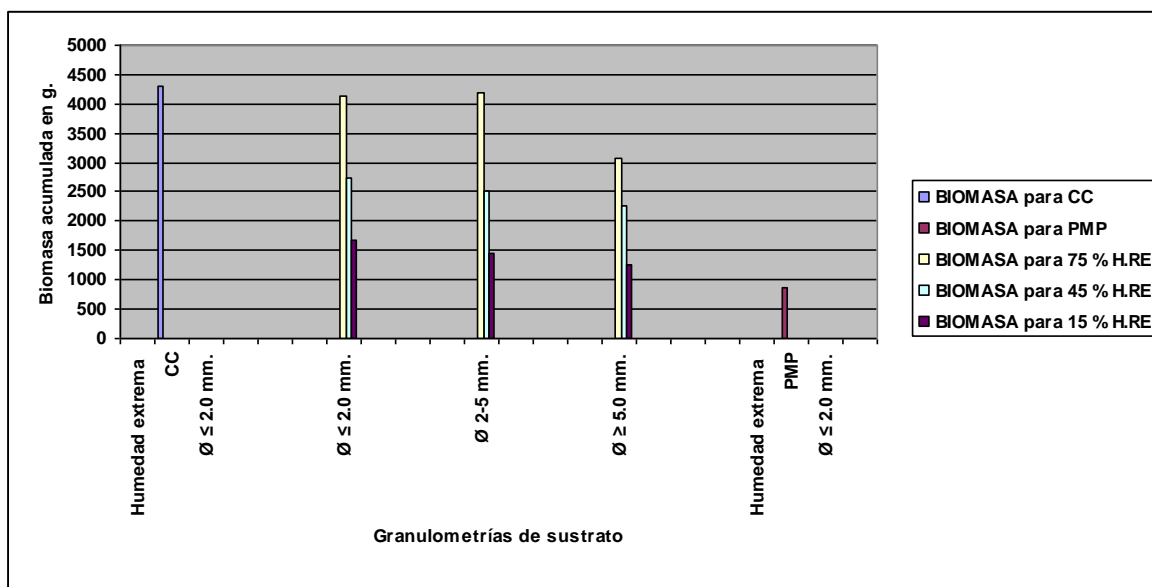


Fig. 6-16 Comparación de biomasa acumulada total (incluyendo frutos y raíces), entre tratamientos de humedad y granulometrías respecto a tratamientos de humedad extrema: a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).

En la figura 6-16, se observa en general que existen diferencias en la acumulación de biomasa entre tratamientos de humedad residual presentando los valores más altos el tratamiento con 75% de humedad residual, también se observa que la acumulación de la biomasa entre tratamientos con diferente diámetro de granulometría del sustrato es diferente presentando valores más altos a medida que el diámetro del sustrato es más pequeño. En este caso los valores de biomasa para los tratamientos de humedad extrema fungieron como patrones de comparación.

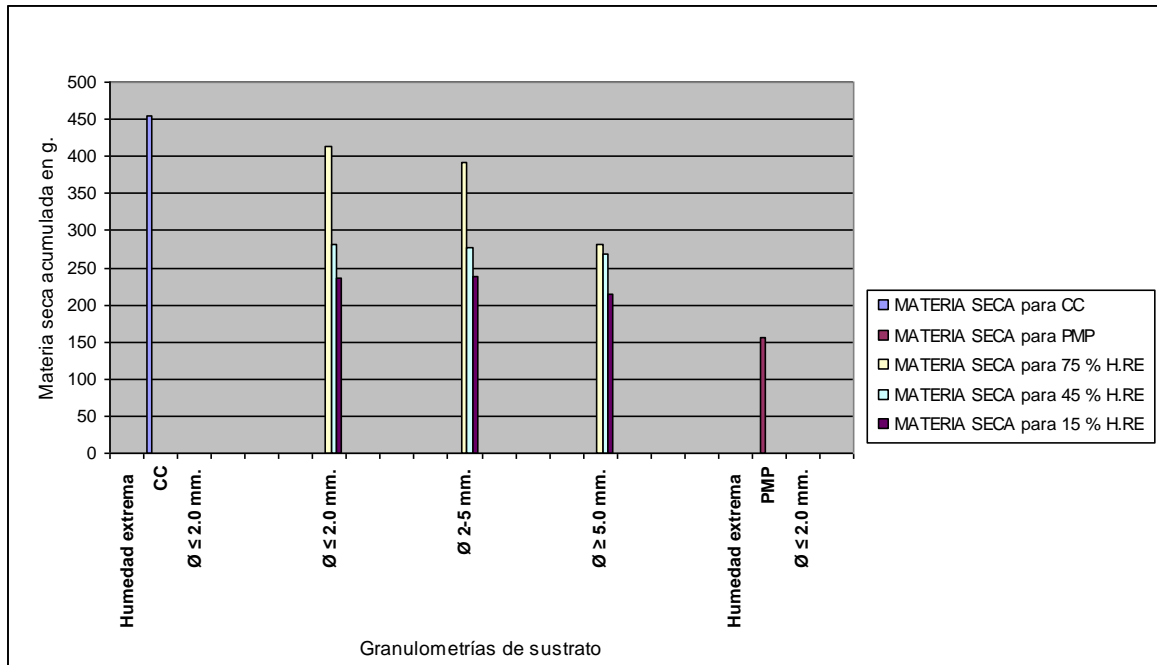


Fig. 6-17 Comparación de materia seca acumulada total (incluyendo frutos y raíces), entre tratamientos de humedad y granulometrías respecto a tratamientos de humedad extrema: a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).

En la figura 6-17, se observa que existen diferencias en la acumulación de materia seca entre tratamientos de humedad residual presentando los valores más altos el tratamiento con 75% de humedad residual, también se observa que la acumulación de materia seca entre tratamientos con diferente diámetro de granulometría del sustrato es diferente presentando valores más altos a medida que el diámetro del sustrato es más pequeño, tal como se presenta en el caso de la acumulación de biomasa. Los valores de materia seca para los tratamientos de humedad extrema se presentan como patrones de comparación.

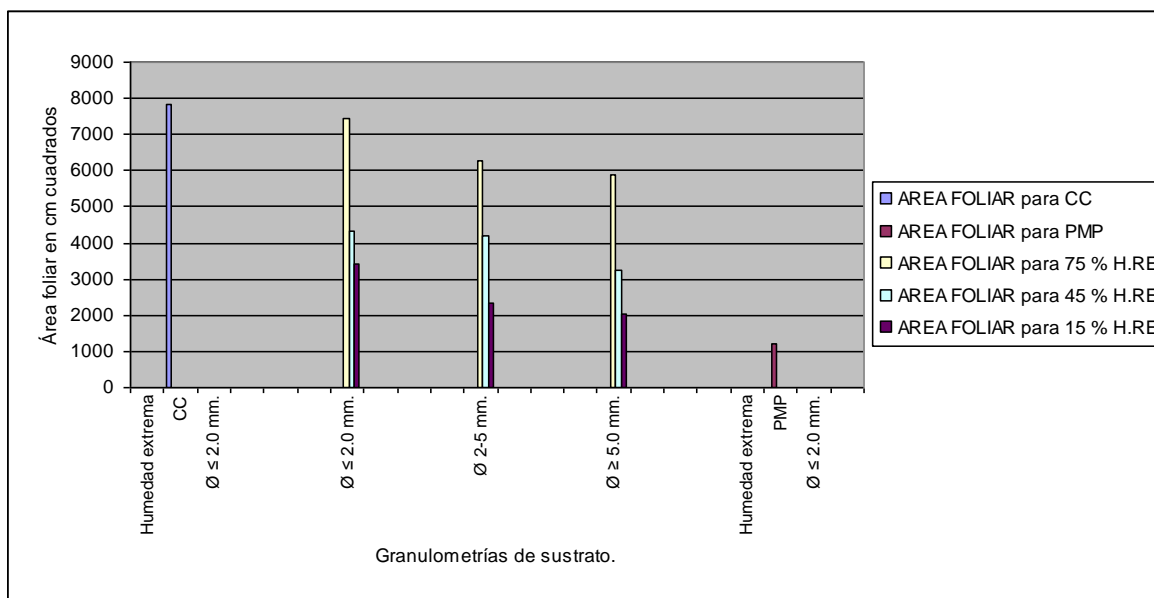


Fig. 6-18 Comparación de área foliar total entre tratamientos de humedad y granulometrías respecto a tratamientos de humedad extrema: a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).

En la figura 6-18, en general se observa que existen diferencias en el desarrollo del área foliar entre tratamientos de humedad residual, presentando los valores más altos de esta variable el tratamiento con 75% de humedad residual, también se observa que el desarrollo de esta superficie foliar entre tratamientos con diferente diámetro de granulometría del sustrato es diferente presentando valores más altos a medida que el diámetro del sustrato es más pequeño. En esta figura también se aprecia que entre los tratamientos de humedad residual al 45 % en sustratos de granulometría fina y mediana no existe mucha diferencia en el desarrollo de la superficie foliar, lo mismo ocurre con los tratamientos de humedad al 75% para las granulometrías mediana y gruesa.



Fig. 6-19 Determinación de superficie de hojas mediante el uso del integrador de área foliar.

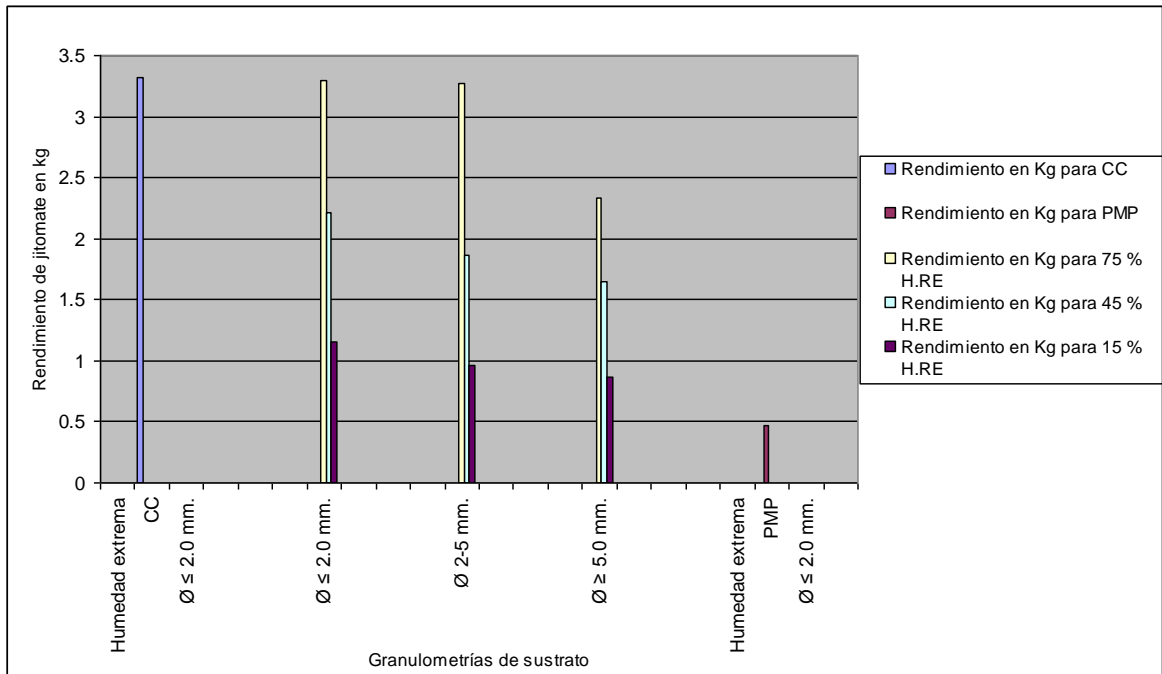


Fig. 6-20 Comparación de rendimiento de jitomate promedio por planta, entre tratamientos de humedad y granulometrías respecto a tratamientos de humedad extrema: a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).

En la figura 6-20, se observa que existen diferencias marcadas en cuanto al rendimiento de jitomate por planta entre tratamientos de humedad residual, presentando los valores más altos de esta variable el tratamiento con 75% de humedad residual. También se observa que el rendimiento entre tratamientos con diferente diámetro de granulometría del sustrato es diferente presentando valores más altos a medida que el diámetro del sustrato es más pequeño. En esta figura también se aprecia que entre los tratamientos de humedad residual al 75 % en sustratos de granulometría fina y mediana no existe mucha diferencia en cuanto a esta variable.



Fig. 6-21 Fruto de jitomate cosechado para un corte

6.6.1. Resumen de Análisis de Variables Fisiotécnicas

Como resumen del análisis de las variables fisiotécnicas de la investigación, se puede decir que:

- a) De los tres diferentes tratamientos de humedad establecidos en sustratos de igual diámetro de granulometría, los resultados obtenidos de las mediciones de variables fisiotécnicas, se observa que en todos los casos, éstas variables presentan los valores más altos para los tratamientos manejados en condiciones de alto porcentaje de humedad (T1 de 100 a 75 % de humedad) y en consecuencia bajo porcentaje de déficit hídrico.
- b) Respecto a los tratamientos de humedad equivalente establecidos en sustratos con diferente diámetro de granulometría, en la mayoría de los casos, las variables analizadas presentan los valores más altos para los tratamientos manejados en condiciones de sustrato con diámetro de granulometría fina ($\emptyset \leq 2\text{mm}$), alto porcentaje de humedad (T1 de 100 a 75 % de humedad) y en consecuencia bajo porcentaje de déficit hídrico. De acuerdo al análisis realizado, en ambos casos (Tratamientos de humedad establecidos en sustratos con igual diámetro de granulometría y tratamientos de humedad equivalente en sustratos de granulometría diferente), las magnitudes de las variables obtenidas se encontraron asociados con valores bajos de temperatura foliar (Tf) y altos valores de diferencia de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf).
- c) En general se observa que los valores de las variables medidas para un mismo nivel de humedad, disminuyen al aumentar el diámetro del sustrato, lo cual indica que los sustratos mayores a 2mm de diámetro retienen menor humedad y es en estos tratamientos de baja humedad y de alto % de déficit hídrico, donde se presentan los valores más altos de temperatura foliar y valores más bajos de (Ta-Tf) contrarios a los tratamientos con alta humedad y bajo déficit hídrico. Lo anterior demuestra que:

- Altas temperaturas foliares indican bajo nivel de humedad, alto déficit hídrico y rendimientos bajos del cultivo.

- Por lo contrario, bajas temperaturas foliares corresponden con altos niveles de humedad, bajo déficit hídrico y altos valores de las variables fisiotécnicas de la planta.

- La temperatura foliar constituye un buen indicador del estrés hídrico, el cual presenta una relación directamente proporcional con el déficit hídrico e inversamente proporcional con la producción y rendimiento de los cultivos.

Nota: Humedad equivalente, se refiere a un mismo volumen de agua colocado en varios sustratos cada uno con diferente diámetro de granulometría.

6.6.2. Análisis de varianza para la variable: rendimiento

Se efectuó el análisis de varianza con respecto a la variable de rendimiento. Los resultados del análisis, se presentan en la tabla 6-11. En esta tabla se observa que hay efectos significativos de tratamientos con probabilidad de 0.05 ya que (F) calculada es mayor a (F) de tablas. Por lo que se procedió a realizar también una prueba de medias para determinar los tratamientos que presentaron diferencias significativas en el rendimiento, utilizando el método de la diferencia mínima significativa modificada (DMS). Ver tabla (24) del apéndice I

Tabla 6-11 Análisis de varianza para la variable: rendimiento de jitomate por planta promedio de tres cortes.

Fuentes de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada
Tratamientos	10	32.08	3.20	800
Error	22	0.09	0.004	
Total	32	32.17		
F de tablas	2.297 con $\alpha = 0.05$			

Los resultados de la prueba de medias se presentan en la tabla 6-12. En esta tabla se observa que los contrastes entre los tratamientos: T1-T2, T1-T10, T2-T10, T3-T4 y T8-T9. Fueron los tratamientos que no presentaron diferencias significativas al hacer su respectiva comparación de medias, pero todos los demás tratamientos resultados de la combinatoria del método, presentan diferencias significativas unos con otros, (ver tablas 24 y 25) del apéndice I.

Tabla 6-12 Prueba de medias para la variable: rendimiento de jitomate en kg.

Comparación de medias de tratamientos (efectos)	
$\bar{r}_i - \bar{r}_j$ (Contrastes)	Intervalo de Confianza
$\bar{r}_1 - \bar{r}_2$	(-0.175720104, 0.179720104)*
$\bar{r}_1 - \bar{r}_3$	(0.764279896, -0.760279896)**
$\bar{r}_1 - \bar{r}_4$	(0.884279896, -0.880279896)**
$\bar{r}_1 - \bar{r}_{10}$	(-0.225720104, 0.229720104)*
$\bar{r}_2 - \bar{r}_{10}$	(-0.245720104, 0.249720104)*
$\bar{r}_3 - \bar{r}_4$	(-0.075720104, 0.079720104)*
$\bar{r}_3 - \bar{r}_5$	(0.264279896, -0.260279896)**
$\bar{r}_3 - \bar{r}_{10}$	(-1.185720104, 1.189720104)**
$\bar{r}_4 - \bar{r}_9$	(1.154279896, -1.150279896)**
$\bar{r}_8 - \bar{r}_9$	(-0.095720104, 0.099720104)*
$\bar{r}_8 - \bar{r}_{11}$	(0.294279896, -0.290279896)**
$\bar{r}_{10} - \bar{r}_{11}$	(2.654279896, -2.650279896)**

*No significativo, **Significativo con $\alpha = 0.06$

6.7. Modelos de Rendimiento

Relacionando los valores de temperatura foliar (T_f) y ($T_a - T_f$) obtenidos con los “modelos lineales base” para sustratos de granulometría fina, con valores observados de la variable fisiotécnica “Rendimiento de jitomate” se generaron dos modelos cuadráticos que estiman el rendimiento del cultivo de jitomate en función de la temperatura foliar. Las Figuras 6-22 y 6-23 muestran los modelos generados, con su respectivo coeficiente de determinación R^2 . En estas figuras se observa que al aumentar la temperatura foliar, disminuye el rendimiento y en el mismo sentido pero de forma inversa al valor de temperatura foliar, al disminuir las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje, también disminuye el rendimiento del cultivo.

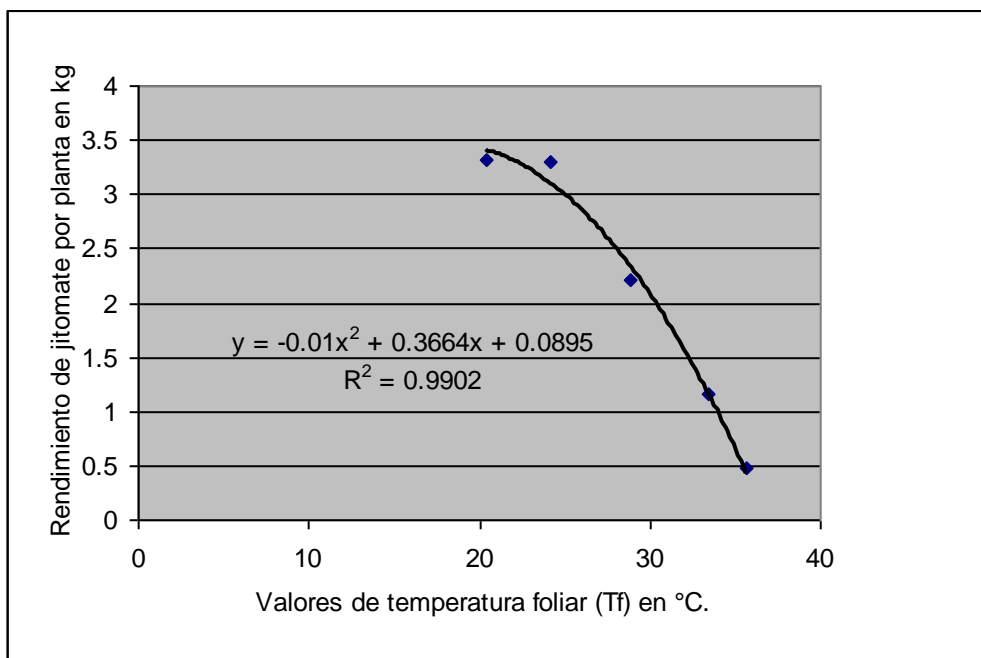


Fig. 6-22 Relación entre temperatura foliar (Tf) en °C y rendimiento de jitomate en Kg para tratamientos de humedad en tezontle fino, diámetro menor, igual a 2 mm

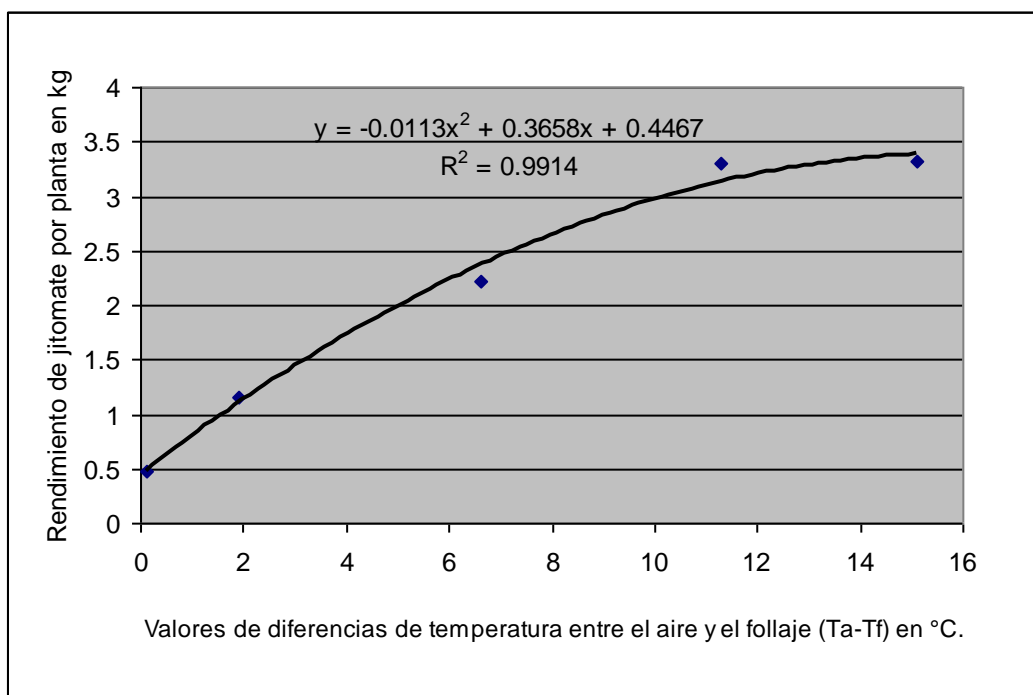


Fig. 6-23 Relación entre valores de diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf) en °C y rendimiento de jitomate para tratamientos de humedad en tezontle fino, diámetro menor, igual a 2 mm

En estas gráficas (6-22 y 6-23) cada punto representa el promedio de tres observaciones de rendimiento por tratamiento de humedad y los puntos extremos corresponden a los tratamientos testigo CC y PMP respectivamente.

6.7.1. Evaluación y validación de modelos de rendimiento.

Al evaluar en los modelos de rendimiento, los valores de temperatura foliar (Tf) y (Ta-Tf) estimados para sustratos con granulometría fina, mediana y gruesa, Tablas 6-13 y 6-14, se observa que al aumentar la temperatura foliar disminuye el rendimiento del cultivo, lo mismo ocurre con los valores de (Ta-Tf), donde al disminuir los valores de estas diferencias de temperatura, también disminuye el rendimiento. Las Tablas 6-13a y 6-14a muestran los resultados de la estimación de rendimientos de jitomate para valores de (Tf) y (Ta-Tf) respecto a los tratamientos de humedad y diámetros de granulometría de sustrato considerados. Una vez evaluados estos modelos, al comparar sus respectivas estimaciones de rendimiento, respecto a los tratamientos de humedad en granulometría fina se observa que la desviación absoluta promedio (DAP) de ambos valores o índices, son muy similares, sin embargo (Ta-Tf) resultó con una desviación ligeramente más pequeña Tabla 6-14b, por lo que para estimar el rendimiento de jitomate pueden emplearse cualquiera de los dos modelos.

Tabla 6-13 Valores de temperatura foliar (Tf) en °C, evaluados en el modelo $Y = -0.01X^2 + 0.3664X + 0.0895$, para estimación de rendimientos de jitomate

Tratamientos	Ø ≤ 2mm	Ø 2 a 5mm	Ø ≥ 5mm
% de humedad	T°C. Follaje	T°C. Follaje	T°C. Follaje
PMP	35.7	37.6	37.5
T7	33.4	35	34.9
T4	28.8	29.7	29.7
T1	24.2	24.5	24.6
CC	20.4	20.1	20.3

Y= Rendimiento de jitomate en Kg

X= Temperatura foliar en °C

Tabla 6-13a Estimación de rendimientos de jitomate por planta en kg, en función de la temperatura foliar (Tf) en °C.

Rendimiento = - 0.01(Tf) ² + 0.3664(Tf)+ 0.0895				
		T°C. Follaje	T°C. Follaje	T°C. Follaje
% de Humedad	Ø ≤ 2mm	Ø ≤ 2mm	Ø 2 a 5mm	Ø ≥ 5mm
	Rendimiento en kg	Rendimiento en kg	Rendimiento en kg	Rendimiento en kg
	Observado	Estimado	Estimado	Estimado
PMP	0.475	0.425	0	0
T7	1.16	1.172	0.663	0.697
T4	2.218	2.347	2.151	2.151
T1	3.295	3.1	3.064	3.051
CC	3.325	3.402	3.414	3.407

Y= Rendimiento de jitomate en Kg

X= Temperatura foliar en °C

Tabla 6-14 Diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf) en °C, evaluadas en el modelo $Y = - 0.0113X^2 + 0.3658X + 0.4467$, para estimación de rendimientos de jitomate

Tratamientos	(Ta-Tf)°C	(Ta-Tf)°C	(Ta-Tf)°C
% de humedad	Ø ≤ 2mm	Ø 2 a 5mm	Ø ≥ 5mm
PMP	0.1	0	0
T7	1.9	0.2	0
T4	6.6	5	4.9
T1	11.3	9.9	10
CC	15.1	13.9	14.2

Tabla 6-14a Estimación de rendimientos de jitomate en función de (Ta-Tf) en °C

Rendimiento = - 0.0113(Ta-Tf) ² + 0.3658(Ta-Tf)+ 0.4467				
		(Ta-Tf)°C	(Ta-Tf)°C	(Ta-Tf)°C
% de Humedad	Testigo Ø ≤ 2mm	Ø ≤ 2mm	Ø 2 a 5mm	Ø ≥ 5mm
	Rendimiento en kg	Rendimiento en kg	Rendimiento en kg	Rendimiento en kg
	Observado	Estimado	Estimado	Estimado
PMP	0.475	0.483	0	0
T7	1.16	1.101	0.519	0.373
T4	2.218	2.369	1.993	1.968
T1	3.295	3.137	2.961	2.975
CC	3.325	3.394	3.348	3.363

Tabla 6-14b Desviación Absoluta Promedio en % para modelos de Rendimiento en función de valores de Temperatura foliar y (Ta-Tf).

Valores de Temperatura	(TA-TF)°C	T°C. Follaje
Modelo de Rendimiento	$Y = - 0.0113X^2 + 0.3658X + 0.4467$	$Y = - 0.01X^2 + 0.3664X + 0.0895$
Granulometría de Sustrato	Ø ≤ 2mm	Ø ≤ 2mm
(DAP) en %	4.0896	5.124

6.8. Momento de Riego

Retomando del apartado (6.5.2.) los valores de temperatura foliar (Tf) y (Ta-Tf) estimados, y asociando estos valores con los parámetros de % de déficit de humedad y rendimiento de jitomate considerados en la secciones 6.7. y 6.7.1.); de acuerdo con (USDA), quien establece que para decidir sobre el momento u oportunidad del riego, en primer lugar se define un consumo permisible, por lo que este es el contenido mínimo de agua en el suelo, permitido antes del riego, de manera que no se presenten condiciones no deseables de tensión de humedad para el cultivo, y considerando una disminución de 30 a 60 % de la humedad aprovechable para este propósito, al respecto en las Tablas 6-15 y 6-16, se observa que esta condición se cumple para los parámetros de % de déficit de humedad de (39.9 a 70.0) y rendimientos de jitomate de (2.77 a 1.81)kg promedio por planta, cuando la temperatura foliar alcanza rangos de (26.5 a 31.1) °C y % de déficit de humedad de (40.1 a 69.7) y rendimientos de jitomate de (2.80 a 1.81)kg promedio por planta, cuando las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf) son de (4.3 a 8.9)°C respectivamente. Sin embargo, de acuerdo con el análisis de varianza y prueba de medias obtenido para el rendimiento de jitomate, se observa que el tratamiento uno con humedad residual de 75 % y $\emptyset \leq 2\text{mm}$, no presenta efectos significativos con el tratamiento diez con humedad residual al 100 % (Capacidad de Campo), respecto a los valores de rendimiento, mientras que el tratamiento cuatro con humedad residual de 45 % con $\emptyset \leq 2\text{mm}$, así como el tratamiento siete con humedad residual de 15 % y $\emptyset \leq 2\text{mm}$, si presentan efectos significativos con el tratamiento diez mencionado que fungió como testigo, por lo cual el momento de riego en esta investigación para el cultivo de jitomate queda definido por el % de déficit de humedad de 24.8 a 24.7 y 75.2 a 75.3 % de humedad residual, con rendimiento de jitomate de 3.10 a 3.13 Kg, cuando la temperatura foliar alcanza un valor promedio de 24.2 °C y una diferencia de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf) de 11.3 °C. Lo cual define el momento de riego del cultivo de jitomate en esta investigación, basado en la temperatura foliar y las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf) obtenidas mediante termómetro de infrarrojo. De esta manera el momento de riego estará sujeto a la observación de los valores de: temperatura foliar (Tf) y diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf) acotados dentro de los límites de los valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente, donde a cada valor de temperatura foliar y de (Ta -Tf) le corresponde un valor de % de

déficit de humedad de sustrato. Cabe aclarar que debido a que los valores de rendimiento obtenidos en este trabajo con los modelos respectivos fueron ajustados a los datos de rendimiento observados de la cosecha del cultivo experimental, dichos valores pueden variar en función de otras variables, tales como condiciones nutrimentales, buenas prácticas agrícolas, así como del control adecuado de plagas y enfermedades del cultivo. Lo que indica que la temperatura foliar como indicador del estrés por humedad solo explica parcialmente el rendimiento obtenido por un cultivo. Sin embargo en lo que respecta a la temperatura foliar se observó que esta constituye una función de respuesta directa con el déficit de humedad del sustrato de una planta y en consecuencia con el estrés hídrico de la misma. Las tablas 6-15 y 6-16, muestran los valores de temperatura foliar y de $(T_a - T_f)$ que indican el momento de riego para consumo permisible de 30 a 60 % de déficit de humedad del sustrato según USDA y 25 % de déficit de humedad del sustrato en el cultivo de jitomate resultados de esta investigación.

Tabla 6-15 Valores de temperatura foliar (Tf) medidos a las 14: 00 pm, que indican el momento de riego para consumo permisible de 70, 40 y 25 % de déficit de humedad del sustrato en el cultivo de jitomate según USDA y resultados de la investigación.

T°C. Follaje	*%Déficit Humedad	Humedad Residual	Rendimiento en kg
Estimada	Estimado	en %	Estimado
35.7	100.2	(0.1 a 0.3)	0.425
34.9	94.9	5	0.697
34.1	89.7	10	0.956
33.4	85.1	15	1.172
32.6	79.9	20	1.407
31.9	75.3	25	1.602
31.1	70.0**	30**	1.812
30.3	64.8	35	2.011
29.6	60.2	40	2.173
28.8	55.0	45	2.347
28	49.7	50	2.509
27.3	45.1	55	2.639
26.5	39.9**	60**	2.777
25.8	35.3	65	2.886
25	30.1	70	3
24.2	24.8*	75*	3.1
23.5	20.2	80	3.177
22.7	15.0	85	3.254
21.9	9.7	90	3.318
21.2	5.2	95	3.363
20.4	0.1	99.9 a 100 (CC)	3.402

CC = % de humedad a capacidad de campo

** (70 a 39.9), (30 a 60) = Rangos de % de déficit de Humedad y Humedad Residual del sustrato para el momento de riego según USDA, quien indica que el contenido mínimo de agua en el suelo, permitido antes del riego, de manera que no se presenten condiciones inadecuadas de tensión de humedad del cultivo es de 30 a 60 % de humedad aprovechable para propósitos de buen manejo del riego.

* (24.8), (75) = Valores de % de déficit de Humedad y Humedad Residual del sustrato para el momento de riego resultados de esta investigación.

Tabla 6-16 Valores de (Ta-Tf) medidos a las 14: 00 pm, que indican el momento de riego para consumo permisible de 70, 40 y 25 % de déficit de humedad del sustrato en el cultivo de jitomate según USDA y resultados de la investigación.

(TA-TF)°C	% Déficit Humedad	Humedad Residual	Rendimiento en kg
estimada	ESTIMADO	en %	Estimado
0.1	99.9	(0.1 a 0.3)	0.483
0.4	94.8	5	0.591
1.1	90.3	10	0.835
1.9	85.2	15	1.101
2.7	80	20	1.352
3.5	74.9	25	1.589
4.3	69.7**	30**	1.811
5	65.2	35	1.993
5.8	60.1	40	2.188
6.6	54.9	45	2.369
7.4	49.8	50	2.535
8.1	45.3	55	2.668
8.9	40.1**	60**	2.807
9.7	35	65	2.932
10.5	29.9	70	3.042
11.3	24.7*	75*	3.137
12	20.2	80	3.209
12.8	15.1	85	3.278
13.6	9.9	90	3.332
14.4	4.8	95	3.371
15.1	0.3	99.7 a 100 (CC)	3.394

** (70 a 40), (30 a 60) = Rangos de % de déficit de Humedad y Humedad Residual del sustrato para el momento de riego según USDA

* (24.7), (75) = Valores de % de déficit de Humedad y Humedad Residual del sustrato para el momento de riego resultados de esta investigación.

6.8.1. Comparación de resultados de investigación y el método CWSI.

El método del Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI, por sus siglas en inglés), es una medida de la transpiración que ocurre en una planta en el tiempo de medición, mediante el registro de la temperatura de la planta y el déficit de presión de vapor del agua. Este método utiliza los datos de temperatura foliar para determinar el momento de riego y se expresa mediante la siguiente expresión: $CWSI = (dT - dT_i) / (Dt_s - dT_i)$, donde dT es la diferencia medida entre la temperatura del aire y del cultivo; Dt_s es el límite superior de las temperaturas del aire menos la temperatura del follaje (cultivo bien regado). Para determinar el límite superior e inferior en la ecuación del CWSI, se usa el método desarrollado por Idso et al., (1981) que consideran los cambios en los límites superior e inferior debido a la variación del déficit de presión de vapor de agua (DPV) el cual se basa en la teoría del balance energético que separa la radiación neta en calor sensible del aire y calor latente que incide en la transpiración. Varios investigadores como Anconelli et al., (1994), Simsek et al., (2005) y Erdem et al., (2005) han obtenido los parámetros de la regresión lineal en varios cultivos, donde la relación de las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje depende del (DPV). Estos mismos investigadores han obtenido valores umbrales del índice de estrés hídrico CWSI, en diferentes cultivos agrícolas, incluyendo al jitomate para la programación del riego. En cambio, en la presente investigación el método utilizado para determinar el momento de riego se basó en la medición del déficit de humedad del sustrato del cultivo como una función de la temperatura de la cobertura foliar y de las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (cobertura foliar). Los valores de temperatura de la cobertura foliar y las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje, fueron obtenidas a través de una serie de registros a lo largo del periodo fenológico del cultivo en el horario establecido como de máxima temperatura ambiental y radiación solar para días despejados (14:00pm). El horario indicado se consideró debido a que coincide con el momento en que los estomas se cierran, la transpiración de la planta decrece y como consecuencia de esto la temperatura de la cobertura foliar aumenta en función de la humedad presente en el sustrato. Los registros de temperatura se asociaron con lecturas de déficit de humedad del sustrato (tezontle granulometría fina) resultados de calibración del aparato detector de humedad (TDR). De la asociación entre los valores de temperatura y déficit de humedad de sustrato mencionados, se generaron modelos

lineales que estiman la temperatura del follaje en función del % de déficit de humedad del sustrato, modelos lineales que estiman el % de déficit de humedad del sustrato pero en función de la temperatura foliar, así como modelos lineales que estiman el déficit de humedad del sustrato en función de la temperatura foliar y de las diferencias de temperatura entre el aire y la hoja, de tal manera que el momento de riego depende de la observación de los valores de temperatura foliar (Tf) y diferencias de temperatura entre el aire y la hoja (Ta-Tf), previamente establecido un consumo mínimo permisible de humedad del sustrato. El método del CWSI, utiliza los valores de las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje estimados a partir del déficit de presión de vapor (DPV) como parámetros para definir un valor umbral entre 0 y 1 que indican el momento de riego para un cultivo, mientras que el método empleado en esta investigación también utiliza los valores de las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf) así como la temperatura de la cobertura foliar (Tf), para estimar el % de déficit de humedad del sustrato con lo que se determina el momento de riego, de tal forma que a cada valor de temperatura foliar y de (Ta -Tf) le corresponde un valor de % de déficit de humedad de sustrato. En la tabla (6-17), se presenta la comparación de ambos métodos a través de los modelos y fórmulas obtenidas, así como por sus parámetros para determinar el momento de riego en cada caso.

Tabla 6-17. Comparación entre parámetros que indican el momento de riego resultados de esta investigación, consumo mínimo permisible según USDA, y valores umbrales del índice de estrés hídrico CWSI, obtenidos por varios investigadores en diferentes cultivos agrícolas, incluyendo al jitomate para la programación del riego.

Autor	Modelo	Parámetro	Cultivo
Resultados de investigación	$Tf = 0.1525(\%DHS)+20.418$	Temp foliar = 24.2 °C	Jitomate
Resultados de investigación	$\%DHS=6.5462(Tf)-133.76$	% DHS = 24.8	Jitomate
Resultados de investigación	$(Ta-Tf) = -0.1555(\%DHS)+15.141$	(Ta-Tf) = 11.3 °C	Jitomate
Resultados de investigación	$\%DHS = -6.4084(Ta-Tf)+97.21$	%DHS = 24.7	Jitomate
Anconelli et al., (1994)	$CWSI = (dT-dT_i)/(dT_s-dT_i)$	Umbral CWSI = 0.35	Jitomate
Nielsen (1990)	$CWSI = (dT-dT_i)/(dT_s-dT_i)$	Umbral CWSI = 0.35	Soya
Erdem et al., (2005)	$CWSI = (dT-dT_i)/(dT_s-dT_i)$	Umbral CWSI = 0.6	Sandía
Simsek et al., (2005)	$CWSI = (dT-dT_i)/(dT_s-dT_i)$	Umbral CWSI = 0.2	Pepino
USDA	Consumo Mínimo Permisible	30 a 60 % de *HRE	Jitomate

*HRE = Humedad Residual.

VII. CONCLUSIONES

7.1. ESPECÍFICAS

7.1.1. Se concluye que entre la temperatura del aire, energía solar, evaporación y evapotranspiración, existen relaciones directamente proporcionales, debido a que éstas aumentan o disminuyen en función de una variable dominante (radiación solar), mientras que la humedad relativa presenta una relación inversamente proporcional respecto al resto de las variables. La temperatura del follaje aumenta o disminuye en forma proporcional a la magnitud de las variables meteorológicas registradas en el invernadero pero su aumento o disminución son inversamente proporcionales con la cantidad de humedad acumulada en el sustrato.

7.1.2. Se concluye que los tres tratamientos con diámetros de granulometría diferente para un mismo tratamiento de humedad presentan valores diferentes de temperatura foliar, resultando con temperatura de cobertura foliar más baja el tratamiento con granulometría fina; lo que demuestra que los sustratos más gruesos retienen menor cantidad de agua y en consecuencia presentan mayor déficit de humedad lo cual se refleja a través del aumento de la temperatura de la hoja. De los tres tratamientos de granulometrías de sustrato manejados, el más adecuado para determinar el déficit de humedad en función de la temperatura foliar es el sustrato fino ($\emptyset \leq 2\text{mm}$), por presentar mayor afinidad con el aparato registrador de contenido hídrico (TDR). Lo anterior quedó demostrado, por los resultados obtenidos al relacionar las variables de % de déficit de humedad y granulometría del sustrato, con lo cual se acepta esta hipótesis.

7.1.3. Con base en los modelos lineales obtenidos para estimar el porcentaje de déficit de humedad del sustrato en función de la temperatura foliar (T_f) y de las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje ($T_a - T_f$) que presentaron mejor ajuste: $Y = 6.5462(X) - 133.76$, y $Y = -6.4084(X) + 97.21$ respectivamente, correspondientes a tratamientos de humedad en diámetro de granulometría fina: se concluye que la temperatura del follaje ó cobertura foliar (T_f) y la diferencia de temperaturas entre el aire y la cobertura foliar ($T_a - T_f$), representan indicadores de estrés hídrico del cultivo al estar relacionados con un nivel específico de déficit de humedad en el sustrato.

7.1.4. Se concluye que el estrés hídrico presenta una relación directamente proporcional con el déficit de humedad, e inversamente proporcional con la producción y rendimiento de los cultivos ya que altas temperaturas foliares medidas en las horas del día de máxima radiación solar y temperatura ambientales, se relacionan con bajos niveles hídricos en el sustrato. Por el contrario, bajas temperaturas foliares medidas en las condiciones señaladas corresponden con altos niveles de humedad, bajo déficit hídrico y altos índices de producción o rendimiento de la planta. Lo anterior se dedujo del análisis de las variables fisiotécnicas, donde se observó que los valores de los índices de rendimiento medidos para un mismo nivel de humedad, disminuyen al aumentar el diámetro del sustrato, lo cual indica que los sustratos mayores a 2mm de diámetro retienen menor humedad y es en estos tratamientos de baja humedad y de alto % de déficit hídrico, donde se presentan los valores más altos de temperatura foliar y valores más bajos de $(T_a - T_f)$ contrarios a los tratamientos con alta humedad y bajo déficit hídrico.

7.2. GENERAL.

7.2.1. De acuerdo a los resultados del análisis de varianza y prueba de medias obtenido para el rendimiento de jitomate, donde se observó que el tratamiento uno con humedad residual de 75 % y $\emptyset \leq 2\text{mm}$, no presenta efectos significativos con el tratamiento T10(CC) con humedad residual al 100 % (Capacidad de Campo), mientras que el tratamiento T4_(2,1) con humedad residual de 45 % con $\emptyset \leq 2\text{mm}$, así como el tratamiento T7_(3,1), con humedad residual de 15 % y $\emptyset \leq 2\text{mm}$, si presentaron efectos significativos con el tratamiento T10(CC) que fungió como testigo: se concluye que el momento de riego del cultivo de jitomate en esta investigación, queda definido mediante los parámetros del % de déficit de humedad en el sustrato de 24.8 a 24.7 y 75.2 a 75.3 % de humedad residual, con rendimiento de jitomate de 3.10 a 3.13 kg, cuando la temperatura foliar alcanza un valor promedio de 24.2 °C y una diferencia de temperatura entre el aire y el follaje $(T_a - T_f)$ de 11.3 °C. Por lo que el momento de riego estará sujeto a la observación de estos valores acotados dentro de los límites de capacidad de campo y punto de marchitez permanente, donde a cada valor de temperatura foliar y de $(T_a - T_f)$ le corresponde un valor de % de déficit de humedad de sustrato. Esto demuestra que la temperatura foliar, solo explica parcialmente el rendimiento obtenido por un cultivo, sin embargo ésta constituye una función de respuesta directa con el déficit de humedad del sustrato de una planta y en consecuencia con el estrés hídrico de la misma.

VIII. RECOMENDACIONES

- 8.1. Se recomienda calibrar adecuadamente los aparatos detectores de la humedad del sustrato para obtener resultados más precisos.
- 8.2. Se recomienda manejar el cultivo de jitomate en sustratos de tezontle fino ya que de acuerdo a los resultados de esta investigación esta textura presenta mayor precisión y afinidad en la detección de la humedad con aparatos de TDR procurando que el sustrato presente buena aireación en las raíces de la planta.
- 8.3. Se recomienda realizar las lecturas de temperatura foliar y del TDR en días despejados y en la hora en que se presenta la más alta temperatura del aire.
- 8.4. Se recomienda utilizar el índice de temperatura foliar directa para detectar el % de humedad en el sustrato ya que este es un método más práctico para estimar el momento de riego ya que solo requiere de la utilización de un termómetro de infrarrojo y un adecuado adiestramiento en su manejo.
- 8.5. Se recomienda la utilización del termómetro de infrarrojo para detectar la temperatura del follaje por ser un método preciso el cual cuando se usa correctamente, los errores pueden estar entre 0.1 y 0.5°C.
- 8.6. Se recomienda continuar con la investigación y profundización de este tema ya que el estrés hídrico juega un papel fundamental en el rendimiento y producción de los cultivos agrícolas.

IX. LITERATURA CITADA

- Abad M, Martínez PF, Martínez MD, Martínez J, 1993. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. *Actas de Horticultura*, 11:141-154.
- Abad M, Noguera V, Martínez-Herrero MD, Fornes F, Martínez-Corts J, 1989a. Physical and chemical properties of sedge peat-based media and their relation to plant growth. *Acta Horticulturae*, 238:45-56.
- Abad M, Noguera V, Martínez-Herrero MD, Fornes F, Herrero MV, Martínez-Corts J, 1989b. The effects of sedge peat-based media and controlled-release fertilizer on the growth of pot begonia, french marigold and geranium. *Acta Horticulturae*, 246:199-212.
- Abad, B., M. 1997. Sustratos: Propiedades y manejo de materiales orgánicos, minerales y sintéticos inertes y activos. España.
- Abad M, Noguera P, 1998. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. *En: C Cadahía (Coord.). Fertirrigación. Cultivos Hortícolas y Ornamentales.* pp. 287- 342. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid
- Abad M, 1993. Sustratos para el cultivo sin suelo: Inventario y características. *En: F Cánovas, JR Díaz (Eds.). Curso Superior de Especialización sobre Cultivos sin Suelo.* pp. 63-80. I.E.A./F.I.A.P.A., Almería,
- Abad M, 1995. Sustratos para el cultivo sin suelo. *En: F. Nuez (Coord.). El Cultivo del Tomate.* pp. 131-166. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid,
- Abad M, Noguera P, Noguera V, 1996. Turbas para semilleros. *En: II Jornadas sobre Semillas y Semilleros Hortícolas. Congresos y Jornadas 35/96.* pp. 79-102. Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca. Dirección General de la Producción Agraria, Sevilla.
- Aldrich, A.R. y Bartok, J. Jr. 1994. *Greenhouse Engineering.* Natural Resources Management and Engineering Department. University of Connecticut, Storrs. N.Y.
- Allen, R.G., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements- FAO Irr. And drain. Paper 56. Roma, Italia.
- AMPHI-MÉXICO, 2003. Asociación de productores de hortalizas en invernadero, situación actual del cultivo de jitomate bajo invernadero. Primer Congreso Internacional del cultivo de jitomate. Celaya, México. Memoria de presentaciones. Ponencia número 1.pp:4-8.
- Anconelli, S.; Manzini, P. and Battilani, A. 1994. CWSI and baseline studies to increase quality of processing tomatoes. *Alta Horticulturae (ISHS) 376:303-306 V International Symposium on The Processing Tomato.* http://www.actahort.org/books/376/376_40.htm.

- André JP, 1987. Propriétés chimiques des substrats. *In*: D. Blanc (Dir.). Les Cultures Hors Sol. 2éme éd. pp. 127-152. Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Paris.
- André, M. and H. Du Cloux. 1993. Interaction of CO₂ enrichment and water limitations on photosynthesis and water efficiency in wheat. *Plant physiol. And Biochem.* 31:103-112.
- Ansorena J., 1994. Sustratos. Propiedades y Caracterización. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 172 pp.
- Aston, A.R. and Van Bavel, C.H.M, 1972. "Soil Surface Water Depletion and Leaf Temperature." *Agronomy Journal* 64, pages 368-373.
- Australian Standard (AS 3743), 1993. Australian Standard for Potting Mixes. 2nd ed. Standards Australia, Standards Association of Australia. Homebush, NSW (Australia), 28 pp.
- Bazzaz, F. A. and E. D. Fajer. 1992. Plant life in a CO₂ rich world. *Scient. Amer.* 266: 18-24.
- Bidwell, R.G.S. 1990. Fisiología vegetal. Primera edición en español. AGT. Editor. S.A. México. 784p.
- Blad, B.L, and Rosenberg, N.J, 1976. "Mesuarement of Crop Temperatura by Leaf Thermocouple, Infrared Thermometry, and Remotely Sensed Termal Imagery." *Agronomy Journal* 68, pages 635-641.
- Blad, B.L, Gardner B.R., Watts D.G., and Rosenberg N.J., 1981 " Remote Sensing of crop Moisture Status." *Remote Sensing Quarterly* 3, pages 4-20.
- Blondel, J. y J. Aronson. 1999. Biology and wildlife of the Mediterranean region. Oxford University Press, New York.
- Bowes, G. 1993. Facing the inevitable: Plant and increasing atmospheric CO₂. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 44: 309-332.
- Bunt, A.C., 1988. Media and Mixes for Container-Grown Plants. 2nd ed. Unwin Hyman Ltd., London, 309 pp.
- Carter Gregory A. y Knapp Alan K. leaf optical properties in Higher plants: linking spectral characteristics stress and chlorophyll concentration *American journal of botany.* 2001;88:677-684.
- Castonguay, Y. and A.W. Markhart. 1991. Saturated rates of photosynthesis in water stressed leaves of common bean and tepary bean. *Crop Sci.* 31: 1605-1611.
- Chamarro L., J. 1995. Anatomía y Fisiología de la Planta. Pp. 44-91. *In*: Nuez: El Cultivo del Tomate. Mundi-Prensa, Madrid. España.

Conover CA Poole RT, 1981. Effect of soil compaction on physical properties of otting media and growth of *Picea pubescens* Liebm. "Silver tree". Journal of the American Society for Horticultural Science, 106:604-607.

Coombs et al. 1988. Techniques in bioproductivity and photosynthesis. Pergamon press. Traducción al español por el colegio de postgraduados.pp.258.

Cui, M. and P.S. Nobel. 1994. Gas exchange and growth responses to elevated CO₂ and light levels in the CAM species *Opuntia ficus-indica*. Plant Cell and Enviroment 17: 935-944.

De Boodt M, De Waele N. 1968. Study on the physical properties of artificial soils and the growth of ornamental plants. Pedologie XVIII(3):275-300.

De la Peña, I. Llerena, A. 2001. Manual del uso y manejo del agua. Tercera Edición.

De Santa M, De Santa FO, López. FP. Calera BA., 2005 Agua y Agronomía. Edit. Mundi-prensa. 606 pag.

Di Castri, F., D. W. Goodall y R. L. Specht. 1981. Mediterranean-type shrublands. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

Doorenbos, J. y Pruitt, W.O. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. Irrig. Drain. Pap., 24, 144 pp. FAO. Roma, Italia.

Erdem, Y.; Erdem, A. T.; Orta H.; Okursoy, H. 2005. Irrigation scheduling for watermelon with crop water stress index (CWSI). Journal of Central European Agriculture. Volume 6 (2005) No. 4 (449-460).

Esau, K. 1976. Anatomía Vegetal. Ed. Omega, Barcelona. 779p.

Escudero J, 1993. Cultivo hidropónico del tomate. *En*: F. Cánovas y J.R. Díaz (Eds.). Curso Superior de Especialización sobre Cultivos sin Suelo, pp. 261-297. I.E.A. /F.I.A.P.A., Almería.

Everest, C.E. 1982. Aiming Technique Takes Guesswork Out Of Infrared Thermometry." Industrial Research & Development.

FAO, 2004. Análisis preliminares, del mes de febrero de 2004. *En*: <http://www.fao.org/waicent/faostat/agricult/prod-s.htm>.

FAO. 1976. Las necesidades de agua de los cultivos. Serie FAO N° 24. Estudios del agua sobre riego y drenaje. Roma. 194p.

Flores, V. J. 2005. Consideraciones Ambientales para cultivar Tomate (*Lycopersicon Esculentum* Mill) en Invernadero; Caracterización Climática, Requerimientos de Riego y Modelación de Temperatura. Colegio de Postgraduados. Montecillo. Edo de México. Tesis de Maestría en Hidrociencias.174p.

Florian, M., P. 1997. Sustratos: propiedades, ventajas y desventajas. Conferencia Internacional en Hidroponía Comercial. UNA La Molina. Lima Perú.

Fonteno WC, Cassel DK, Larson RA, 1981. Physical properties of three container media an their effect on poinsettia growth. *Journal American Society for Horticultural Sciences* 106(6):736-741.

Gardner, B.R, Blad B.L, Garrity D.P, and Watts D.G, 1981. “ Relationships Between Crop Temperature, Grain Yield, Evapotranspiration and Phenological Development in Two Hybrids of moisture Stressed Sorghum.” *Irrigation Science* 2, pages 213-224.

Geiser, K.M, Snack D.C., Allred E.R., and Stange K.W, 1982. “Irrigation Scheduling Using Crop Canopy-Air. Temperature Difference.” *Trans. ASAE* (in press).

Grodzinski, B. 1992. Plant nutrition and growth regulation by CO₂ enrichment. *Bio Sci.* 42: 517-525.

Handreck KA, Black, ND, 1991. *Growing Media for Ornamental Plants and Turf*. New South Wales University Press, Kensington (Australia), 401 pp.

Hannan, J.J. 1990. The influence of greenhouse on internal climate with special referente to mediterranean regions. *Acta. Hort.* 287: 23-34.

Hickman, J. C. 1970. Seasonal course of xylem sap tension. *Ecology* 51: 1052-1056.

Hilel, D. 1998. *Enviromental Soil Physics*. Academia Press.

Hsiao, T. C. 1973. Plant responses to water stress. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 24: 519-570.

Jackson, R.D.; Idso, S. B., Reginato, R. J. and Pinter, P. J. 1981. Canopy Temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research* 17: 1133.

Jackson, R.D. 1982. Canopy temperatura and crop water stress. In *advances in irrigation, volumen 1*. D.I. Hillel, editor. Academic press.pp.43-85.

Jones, J., B. Jr. 1999. *Tomato Plant Culture “In the Field, Greenhouse, and Home Garden”*. CRC Press. Florida, U.S.A.

Kerr GP, Hanan J, 1985. Leaching of container media. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 110:474-480.

Kozlowski, T. T., P. J. Kramer y S. G. Pallardy. 1991. *The physiological ecology of woody plants*. Academic Press., Toronto.

Kramer, J.P. 1989. *Relaciones hídricas de suelo y plantas*. Ed. Edutex, S.A. México. Pp: 40-45.

Kumar, A., D.P. Singh. 1994. Influence of water stress on photosynthesis, transpiration, water use efficiency and yield of *Brassica juncea* L. *Field Crops Res.* 37: 95-101.

Lara H., A. 1999. Manejo de la Solución Nutritiva en la producción de Tomate en Hidropónia. Terra Julio-Septiembre. 17:221-229, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo.

Larcher, W. 1995. Physiological plant ecology. Ecophysiology and stress physiology of functional groups. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.

Larcher, W. 1983. Physiological Plant Ecology. Springer-Verlag, Berlin.

Larqué, A., C.M.T. Rodríguez, C. Trejo. 1990. Relaciones agua-planta en frijol. Rev. Terra 8: 18-22.

Larrousse. 1987. Gran Diccionario Enciclopédico de las ciencias. Ediciones Larousse. México D.F. tomo 3.

Lemaire F, Dartigues A, Rivière LM, Charpentier S, 1989. Cultures en Pots et Conteneurs. INRA - PHM Revue Horticole, Paris-Limoges, 184 pp.

Levitt, J. 1980. Responses of plants to environmental stresses. Academic Press, New York.

Linacre, E.T. 1964. A note on a feature of leaf and air temperatures. Agric. Meteorol. 1: 66-72.

López-Gálvez, J., López Hernández, J.C. (1991). El clima se genera dentro de los invernaderos. Edit.FIAPA.

López, J.C., P. Lorenzo, E. Medrano, J.C. Sánchez-Guerrero, J.Pérez, H.M. Puerto y M. Arco. 2000. Calefacción de invernaderos en el sudeste español: resultados experimentales para cultivos de pepino y judía. Caja Rural de Almería. Almería, España. 54 pp.

Ludlow, and R.C. Muchow. 1990. A critical evaluation of traits for improving crop yields in water- limited environments. Adv. Agron. 43: 107-153.

Manual Nacional de Ingeniería. Parte 623. USDA.

Marfà O, Tort JM, Olivella, C, Cáceres R, Martínez FX, 1998. Cattle manure compost as a substrate. II. Conditioning and formulation of growing media for cut flower cultures. Acta Horticulturae, 469:305-312.

Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants Second edition. Ed. Academic press. San Diego, Ca. U.S.A. 889 P.

Martín De Santa Oloalla, M. y De Juan Valero, J. 1993. Agronomía del Riego. Ed. Mundi-Prensa. 732p.

Martínez FX, 1992. Propuesta de metodología para la determinación de las propiedades físicas de los sustratos. Actas de Horticultura, 11:55-66.

Michelot P, 1999. Relations substrat - irrigation. In: P Michelot, C Chambolle (Coord). L'irrigation en pépinière hors sol pp 19-27. Astredor Paris.

Moinereau J, Herrmann P, Favrot JC, Rivière LM, 1987. Les substrats-Inventaire, caractéristiques, ressources. In: D. Blanc (Dir.). Les Cultures Hors Sol. 2ème éd. pp. 15-77. Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Paris.

Morán Susan M. 2000. Thermal infrared measurement as an indicator of plant ecosystem health. USDA-ARS. Tucson, Arizona.

Mota, F.S. da. 1978. El Factor Temperatura en Agricultura. In: "Conferencia Técnica Sobre Aplicaciones de la Meteorología y la Climatología". Instituto Nacional de Meteorología y Universidad Federal de Pelotas. Pelotas, Río Grande do Sul, Brasil.

Mualen Y, 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, 12:513-522.

Newton, P.C.D., H. Clark, C.C. Bell, and E.M. Glasgow. 1996. Interaction of soil moisture and elevated CO₂ on the above-ground growth rate, root length density and gas exchange of turves from temperate pasture. J. Exp. Bot. 47: 771-779.

Nielsen, D. C. 1990. Scheduling irrigations for soybeans with the Crop Water Stress Index (CWSI). Field Crops Research, Volume 23, Issue 2, April 1990, pp:103-116.

Nobel, M. Cui, P.M. Miller, and Y. Luo. 1994. Influences of soil volume and an elevated CO₂ level on growth and CO₂ exchange for the crassulacean acid metabolism plant. Physiol. Plant. 90: 173-180.

Norero, A. 1977. La evapotranspiración de los cultivos; Aspectos Agrofísicos. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras. Mérida, Venezuela.

Nuez, F. 1995. El Cultivo del Tomate. Editorial, Mundi-Prensa. Madrid, España.

Núñez, B.A. 1991. La fisiología del frijol bajo condiciones de sequía. Rev. Fitotecnia Mexicana 14: 269-275.

Ojeda-Bustamante, W., Carrillo G. m., Martínez E. R. 2004. Calendarización de riego: teoría y práctica. IMTA México DF. 249p.

Ojeda-Bustamante, W. 2004-B. Programación del riego bajo condiciones de invernadero. Notas del curso internacional de invernaderos. PUIMECI. Universidad A. Chapingo. Chapingo, México.

Ortega MC, Ordovás J, Carmona E, Aguado MT, Moreno MT, 1998. El nitrógeno en la obtención y mejora de un sustrato de origen vegetal. Actas de Horticultura 23: 65-78.

Ortega, S. y Acevedo, C. 1999. Programación de Riego. Cartilla técnica Comisión Nacional de Riego y Universidad de Talca. 16p.

Ortiz, S. C.A. 1987. Elementos de agrometeorología cuantitativa. 3^a ed. Departamento de suelos, UACH. Chapingo Mex. 320p.

Pérez, G., M., y R. Castro, B. 1999. Guía para la producción intensiva de jitomate en invernadero. Boletín de Divulgación # 3. Programa Universitario de Investigación y Servicio en Olericultura. Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.

Peterson JC, 1981. Modify your pH perspective. Florists' Review, 169:34-35.

Puustjärvi V, 1994. La Turba y su Manejo en Horticultura. Ediciones de Horticultura S.L., Reus (Tarragona), pp. 123.

Raviv M, Chen Y, Inbar Y, 1986. Peat and peat substitutes as growth media for containergrown plant. *In*: Y. Chen and Y. Avnimelech (Eds.). The Role of Organic Matter in Modern Agriculture, pp. 257-287. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht (The Netherlands).

Richards D, Lane M, Beardsell, DV, 1986. The influence of particle-size distribution in pinebark : sand : brown coal potting mixes on water supply, aeration and plant growth. *Scientia Horticulturae*, 29:1-14.

Ritchie, S.W., H.T. Nguyen, and A.S. Holday. 1990. Leaf water content and gas-exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. *Crop Sci.* 30: 105-111.

Rodríguez, R.R., Tabares, R. M., Medina, J. A. 1997. Cultivo Moderno del Tomate. Mundi-Prensa. Madrid, España.

Rojas, A.M. 1994. “ Efecto de Algunos Factores Geográficos sobre la Evaporación, en el Estado de Jalisco”. Universidad Autónoma Chapingo. Edo de México. Tesis de Licenciatura en Irrigación. 61p.

Romo, G ,J. Arteaga, R. 1989. Meteorología Agrícola. Departamento de Irrigación; Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo. Mex. Segunda Edición.

Rossenberg, N.J.; Blas, B.I.; Verma, S.B. 1983. Microclimate. The Biological Environment. 2^a ed. Jhon Wiley & Sons.

Rossenberg, N.J. 1974. Microclimate. The Biological Environment. New York. USA. John Wiley and Sons. 315p.

Salazar, S., I. 2006. Elección de Variedades para Invernadero. Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo.

Salisbury, F.B. and C.W. Ross. 1992. Plant Physiology. Wadsworth. Inc. Belmont, Cal. 682p.

Sánchez, del C.F, y J. Ponce O. 1998. Densidad de Plantación y Nivel de Despunte en Jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). Cultivado en Hidropónia. *Revista Chapingo.* 4(2):89-93.

Sánchez, D.M. y J. Aguirreola. 1996. Relaciones hídricas. In: Azcon, y M. Talon (eds.). Fisiología y Bioquímica Vegetal. MC GRAW- HILL-Interamericana de España, España. Pp: 49-90.

Sánchez, D.S. 1990. La eficiencia en el uso del agua y la radiación solar. Revista Chapingo. 71-72: 36-143.

Sandoval, V.M y B. Brizuela Amador, P. 2002. Horticultura Intensiva en Invernaderos. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Montecillo, Edo. De México.

Seeman, J., I. Chirkov, J. Lomas, B. Primault. 1974. Agrometeorology. Springer-Verlog. Berlin.

Shuttleworth, W.J. y Wallace, J.S. 1985. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. Q.J. of the Royal Meteorological Society 111: 839-855.

Simsek, M.; Tonkaz T.; Kacira, M.; Çömlekçiöğlü, N. and Doğan, Z. 2005 The effects of different irrigation regimes on cucumber (*Cucumis sativus* L.) yield and yield characteristics under open field conditions. Agricultural Water Management, Volume 73, Issue 3.

Stone, L.R, and Horton, M.L, 1974. "Estimating Evapotranspiration Using Canopy Temperatures: Field Evaluation." Agronomy Journal 66, pages 540-545.

Stone M.L., Solie J.B., Whitney R.W., Raun W.R. y Lees H.L. Sensors for detection of nitrogen (Referencia completa en la web).

Taiz, L. and E. Zeiger. 1991. Plant Physiology. Benjamin/ Cummins. Redwood City, Cal. 559p.

Thornthwaite, C. W. 1948. An approach toward a racional classification of climate. Geogr. R. 38: 55-94.

Tijerina, Ch. L. 2005. Requerimiento y Calendario de Riego. Programa de Hidrociencias, Instituto de Recursos Naturales. Colegio de Postgraduados; Montecillo, México.

Tijerina, Ch. L. 1992. Uso eficiente del agua en unidades de riego para el desarrollo rural. Diplomado. Colegio de Postgraduados, Montecillos, México.

Tinus, R.W. 1974. Impact of the CO2 requeriment on plant water use. Agric. Meteorol. 14: 99-112.

Topp, G.C.,Davis, I.L. y Annan, A.P., 1980. Electromagnetic determination of Soil water content: mesuarement in coaxial transmission lines. Water Resour.16: 574-582.

Topp, G.C., 1993. Soil water. En M.R. Carter (Ed). Soil sampling and methods of Analysis. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers.

- Torres, R.E. 1995. Agrometeorología. Editorial Trillas, S.A. México. 154p.
- Tosso, J. y Ferreira, R. 1988. II Programación a través de bandeja. IPA. La Platina N°46.
- USDA. Requerimiento de Agua para Riego. Parte 623. Manual Nacional de Ingeniería S/F.
- Valenzuela, J.L. M. Guzmán; A. Sánchez; A. del Río; and L. Romero. 1993. Relationship between biochemical indicators and physiological parameters of nitrogen and physiological plant age. Pp:251-257. *In*: M.A.C. Fragoso and M.L. van Beusichem (eds). Optimization of Plant Nutrition. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- Valladares, F. 2004. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF. S.A. Madrid. ISBN: 84-8014-552-8. Páginas 163-190.
- Van Genuchten MT, 1978. Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form analytical model: Research Report 78-WR-08. Water Resources Program, Department of Civil Engineering, Princeton University, Princeton, New Jersey.
- Walker, G.K, and Hatfield, J.L. 1979. “ Test of the Stress-Degree-Day Concept Using Multiple Planting Dates of Red Kidney Beans.” *Agronomy Journal* 71, pages 967-971.
- Webb, A.A.R. and T.A. Mansfield. 1992. How do stomata work? *J Biolog. Educ.* 26: 19-26.
- Wiegand, C.L and Namken L.N, 1966. “Influences of Plant Moisture Stress, Solar Radiation, and Air Temperature on Cotton Leaf Temperature.” *Agronomy Journal* 58, pages 552-556.
- Wilson GCS, 1984. The physico-chemical and physical properties of horticultural substrates. *Acta Horticulturae*, 150:19-32.
- www.agronegocios.gob.sv/comoproducir/guiascenta/tomate.pdf
- www.dfpd.edu.uy/G/BIO/BOT/Fisiolog%ADa.pdf.
- www2.uah.es/cemaeta/radiación_%20infrarroja.htm
- www.zytemp.com.mx/teoria.php
- Yu Qiu Gou, Miyamoto K., Sase S., and Ocushima L. 1999. Detection of crop transpiration and water stress by temperatura-related approach Under field and greenhouse conditions.
- Zuang H, Musard M, 1984. Cultures Légumières sur Substrats. Centre Technique Interprofessionel des Fruits et Légumes, Paris, 244 pp.

APENDICE I

Tabla 1. Datos promedio de variables meteorológicas registradas en tiempo real dentro del invernadero.

Tiempo	ET	Rad Solar	Energía Solar	Humedad Rel	Punto de rocío	T.H. Index
hrs	mm	w.m ⁻²	ly	%	°C	°C
08:00 a.m.	0.008	28.2	1.2	96.40	11.5	0
08:30 a.m.	0	80	3.5	89	12.6	0
09:00 a.m.	0.077	139.2	6	79	14	0
09:30 a.m.	0	209.6	9	68.50	15.2	24
10:00 a.m.	0.191	278.4	12	60.60	16.4	26.8
10:30 a.m.	0	377.61	16.3	54	17.1	29.7
11:00 a.m.	0.342	436.6	18.9	49	17.7	32
11:30 a.m.	0	522.6	22.5	44.90	18.1	34.4
12:00 p.m.	0.494	594	25.6	42	18.3	36
12:30 p.m.	0	666.1	28.6	40.70	18.5	36.9
01:00 p.m.	0.598	689.46	30	38.80	18.1	37.3
01:30 p.m.	0	684.35	29.4	38.70	18	37.4
02:00 p.m.	0.595	626.27	26.9	37.80	17.8	37.3
02:30 p.m.	0	515	22.5	37.70	17.48	37.1
03:00 p.m.	0.418	406	17.16	40	17	36.5
03:30 p.m.	0	399.65	17	38.50	17	36.7
04:00 p.m.	0.352	375	16.2	39.60	16.7	35.7
04:30 p.m.	0	319.6	13.9	41.60	16.6	34.7
05:00 p.m.	0.252	249.2	10.8	46	16.6	32.7
05:30 p.m.	0	179	9.9	51.30	16	29.5
06:00 p.m.	0.137	139	5.77	54.30	15.1	27.4
06:30 p.m.	0	96.7	4.13	58.40	15	26.3
07:00 p.m.	0.07	56.83	2.39	64	14.7	24.3
07:30 p.m.	0	27.2	1.2	69.40	14.3	23.4
08:00 p.m.	0.018	5.6	0.23	75.20	14.2	21.2
08:30 p.m.	0	0	0	79.90	13.9	21
09:00 p.m.	0.005	0	0	83	13.7	20.2
09:30 p.m.	0	0	0	85.40	13.6	19.9
10:00 p.m.	0.003	0	0	86.90	13.4	0
10:30 p.m.	0	0	0	88.90	13.4	0
11:00 p.m.	0.002	0	0	89.80	13.2	0
11:30 p.m.	0	0	0	91	13.2	0
12:00 a.m.	0.002	0	0	92.50	13	0
12:30 a.m.	0	0	0	93.30	12.9	0
01:00 a.m.	0.001	0	0	94.30	12.8	0
01:30 a.m.	0	0	0	95	12.7	0
02:00 a.m.	0.000	0	0	95.60	12.6	0
02:30 a.m.	0	0	0	96.10	12.4	0
03:00 a.m.	0.000	0	0	96.40	12.3	0
03:30 a.m.	0	0	0	96.60	12.1	0
04:00 a.m.	0	0	0	97.20	12	0
04:30 a.m.	0	0	0	97.60	11.9	0
05:00 a.m.	0	0	0	98	11.7	0
05:30 a.m.	0	0	0	98.20	11.6	0
06:00 a.m.	0	0	0	98.30	11.3	0
06:30 a.m.	0	0	0	98.70	11.2	0
07:00 a.m.	0	0	0	98.80	11.1	0
07:30 a.m.	0	1.9	0.08	98.70	11	0
08:00 a.m.	0.008	28.2	1.2	96.40	11.5	0

ET =Valores de Evapotranspiración registrados por la estación agrometeorológica Dvis.

Tabla 2. Datos promedio de temperaturas del aire y el follaje para tres tratamientos de humedad en sustrato de tezontle con granulometría fina.

	EV. Tanque	Air	75% Hum. Residual	45% Hum. Residual	15% Hum. Residual
Tiempo	En mm.	Temp °C	T1 _(1,1) T°C. Follaje	T4 _(2,1) T°C. Follaje	T7 _(3,1) T°C. Follaje
08:00 a.m.	0	12.2	12.5	12.4	11.4
08:30 a.m.	0	14.7	14.7	14.7	14.7
09:00 a.m.	0	18.2	15	15.7	16.9
09:30 a.m.	0	21.8	16.2	18	19.9
10:00 a.m.	0.203	25.2	18.1	20.9	23.7
10:30 a.m.	0	28	19.6	22.7	25.9
11:00 a.m.	0.362	30.3	21.4	25.2	29.1
11:30 a.m.	0	32.3	21.9	26	30.1
12:00 p.m.	0.52	33.7	22.4	27.4	32.8
12:30 p.m.	0	34.5	23	28	33.1
01:00 p.m.	0.632	35.1	23.5	28.6	33.8
01:30 p.m.	0	35.1	23.5	28.3	33.5
02:00 p.m.	0.629	35.2	24.1	28.7	33.7
02:30 p.m.	0	35.1	23.5	28.6	33.8
03:00 p.m.	0.439	34.8	23.2	28.3	33.7
03:30 p.m.	0	34.8	23	28.1	33.3
04:00 p.m.	0.369	34	22.8	27.6	32.5
04:30 p.m.	0	33	22.6	26.6	30.6
05:00 p.m.	0.263	31.1	22	25.5	29.1
05:30 p.m.	0	28.5	21	22.8	25.7
06:00 p.m.	0.146	26.3	20.5	21.1	23.6
06:30 p.m.	0	24.9	20	20.1	22.7
07:00 p.m.	0.074	22.8	19.8	19.7	21
07:30 p.m.	0	20.9	19.5	19.4	19.7
08:00 p.m.	0.02	19.2	19.2	19.2	19.2
08:30 p.m.	0	17.9	18.3	18.2	17.9
09:00 p.m.	0.008	16.9	17.5	17.4	17.5
09:30 p.m.	0	16.3	16.8	16.7	16.8
10:00 p.m.	0.007	15.9	16.3	16.4	16.6
10:30 p.m.	0	15.5	15.8	15.9	16.2
11:00 p.m.	0.006	15.2	15.6	15.8	16
11:30 p.m.	0	14.8	15.3	15.5	15.7
12:00 a.m.	0.005	14.4	14.8	15.3	15.9
12:30 a.m.	0	14.1	14.5	14.9	15.3
01:00 a.m.	0.005	13.9	14	14.8	15.7
01:30 a.m.	0	13.7	14	14.6	15.3
02:00 a.m.	0.005	13.5	13.7	14.5	15.4
02:30 a.m.	0	13.2	13.6	14.1	14.7
03:00 a.m.	0.004	13	13.2	13.7	14.3
03:30 a.m.	0	12.8	13	13.4	13.8
04:00 a.m.	0.004	12.6	13.5	13.5	13.6
04:30 a.m.	0	12.3	13.3	13.5	13.8
05:00 a.m.	0.004	12.1	13.1	13.1	13.2
05:30 a.m.	0	11.9	12.8	12.8	12.9
06:00 a.m.	0.004	11.7	12.7	12.6	12.5
06:30 a.m.	0	11.6	12.5	12.4	12.3
07:00 a.m.	0.004	11.4	12.4	12.3	12.2
07:30 a.m.	0	11.4	12.4	12.2	12
08:00 a.m.	0	12.2	12.5	12.4	11.4

T1, T4 y T = Tratamientos

H = Humedad Consumida

Tabla 3. Datos promedio de diferencias de temperatura entre el aire y el follaje para tres tratamientos de humedad en sustrato de tezontle con granulometría fina.

$\varnothing \leq 2\text{mm}$			
Tiempo	T1 _(1,1)	T4 _(2,1)	T7 _(3,1)
hrs	(Ta-Tf)°C	(Ta-Tf)°C	(Ta-Tf)°C
08:00 a.m.	-0.3	-0.2	0.8
08:30 a.m.	0	0	0
09:00 a.m.	3.7	2.5	1.3
09:30 a.m.	5.6	3.8	1.9
10:00 a.m.	7.1	4.3	1.5
10:30 a.m.	8.4	5.3	2.1
11:00 a.m.	8.9	5.1	1.2
11:30 a.m.	10.4	6.3	2.2
12:00 p.m.	11.3	6.3	0.9
12:30 p.m.	11.5	6.5	1.4
01:00 p.m.	11.6	6.5	1.3
01:30 p.m.	11.6	6.8	2
02:00 p.m.	11.1	6.5	1.5
02:30 p.m.	11.6	6.5	1.3
03:00 p.m.	11.8	6.5	1.1
03:30 p.m.	11.8	6.5	1.5
04:00 p.m.	11.2	6.4	1.5
04:30 p.m.	10.4	6.4	2.4
05:00 p.m.	9.1	5.6	2
05:30 p.m.	7.5	5.7	2.8
06:00 p.m.	5.8	5.2	3
06:30 p.m.	4.9	4.8	2.2
07:00 p.m.	3	3.1	1.8
07:30 p.m.	1.4	1.5	1.2
08:00 p.m.	0	0	0
08:30 p.m.	-0.4	-0.3	0
09:00 p.m.	-0.6	-0.5	-0.6
09:30 p.m.	-0.5	-0.4	-0.5
10:00 p.m.	-0.4	-0.5	-0.7
10:30 p.m.	-0.3	-0.4	-0.7
11:00 p.m.	-0.4	-0.6	-0.8
11:30 p.m.	-0.5	-0.7	-0.9
12:00 a.m.	-0.4	-0.9	-1.5
12:30 a.m.	-0.4	-0.8	-1.2
01:00 a.m.	-0.1	-0.9	-1.8
01:30 a.m.	-0.3	-0.9	-1.6
02:00 a.m.	-0.2	-1	-1.9
02:30 a.m.	-0.4	-0.9	-1.5
03:00 a.m.	-0.2	-0.7	-1.3
03:30 a.m.	-0.2	-0.6	-1
04:00 a.m.	-0.9	-0.9	-1
04:30 a.m.	-1	-1.2	-1.5
05:00 a.m.	-1	-1	-1.1
05:30 a.m.	-0.9	-0.9	-1
06:00 a.m.	-1	-0.9	-0.8
06:30 a.m.	-0.9	-0.8	-0.7
07:00 a.m.	-1	-0.9	-0.8
07:30 a.m.	-1	-0.8	-0.6
08:00 a.m.	-0.3	-0.2	0.8

Tabla4. Datos promedio de temperaturas del aire y el follaje para tres tratamientos de humedad en sustrato de tezontle con granulometría mediana.

Ø 2 a 5mm				
		75% Hum. Residual	45% Hum. Residual	15% Hum. Residual
Tiempo	Aire	T2 _(1,2)	T5 _(2,2)	T8 _(3,2)
hrs	Temp °C	T°C. Follaje	T°C. Follaje	T°C. Follaje
08:00 a.m.	12.2	12.6	12.4	11.5
08:30 a.m.	14.7	14.7	14.7	14.7
09:00 a.m.	18.2	15	16.5	17.8
09:30 a.m.	21.8	16.7	18.8	20.9
10:00 a.m.	25.2	19.5	21.7	24.7
10:30 a.m.	28	20.1	23.3	26.9
11:00 a.m.	30.3	21.6	26.2	30
11:30 a.m.	32.3	23	26.8	31.1
12:00 p.m.	33.7	23	29	32.8
12:30 p.m.	34.5	23.5	28.7	33.2
01:00 p.m.	35.1	24	29.4	34.8
01:30 p.m.	35.1	23.5	29	34.1
02:00 p.m.	35.2	24.3	29.5	34.8
02:30 p.m.	35.1	24	30	34.8
03:00 p.m.	34.8	23.5	29.1	34.5
03:30 p.m.	34.8	23.7	28.4	34.3
04:00 p.m.	34	23	28.6	33.6
04:30 p.m.	33	23.1	27	31.8
05:00 p.m.	31.1	22.5	26.3	30
05:30 p.m.	28.5	21.2	23.6	26.8
06:00 p.m.	26.3	20.2	21.8	24.5
06:30 p.m.	24.9	20	20.8	23.7
07:00 p.m.	22.8	19.8	20.5	22.2
07:30 p.m.	20.9	19.6	20.2	20.6
08:00 p.m.	19.2	19.2	19.2	19.2
08:30 p.m.	17.9	18.2	18.3	18.6
09:00 p.m.	16.9	17.4	17.6	17.8
09:30 p.m.	16.3	17	17.1	17.3
10:00 p.m.	15.9	16.2	16.4	16.6
10:30 p.m.	15.5	16	16.2	16.4
11:00 p.m.	15.2	15.6	15.8	16
11:30 p.m.	14.8	15.3	15.5	15.7
12:00 a.m.	14.4	14.8	15.2	15.8
12:30 a.m.	14.1	14.5	14.7	15.2
01:00 a.m.	13.9	14.1	14.8	15.6
01:30 a.m.	13.7	14.2	14.5	15.4
02:00 a.m.	13.5	13.9	14.3	15.2
02:30 a.m.	13.2	13.6	14.1	14.7
03:00 a.m.	13	13.4	13.8	14.4
03:30 a.m.	12.8	13.2	13.4	13.9
04:00 a.m.	12.6	13.4	13.5	13.6
04:30 a.m.	12.3	13.3	13.6	13.8
05:00 a.m.	12.1	13.1	13.2	13.4
05:30 a.m.	11.9	12.8	12.8	12.9
06:00 a.m.	11.7	12.7	12.6	12.5
06:30 a.m.	11.6	12.6	12.5	12.4
07:00 a.m.	11.4	12.5	12.4	12.3
07:30 a.m.	11.4	12.4	12.3	12.2
08:00 a.m.	12.2	12.6	12.4	11.5

Tabla 5. Datos promedio de diferencias de temperatura entre el aire y el follaje para tres tratamientos de humedad en sustrato de tezontle con granulometría mediana.

Ø 2 a 5mm			
Tiempo	T2 _(1,2)	T5 _(2,2)	T8 _(3,2)
hrs	(Ta-Tf)°C	(Ta-Tf)°C	(Ta-Tf)°C
08:00 a.m.	-0.4	-0.2	0.7
08:30 a.m.	0	0	0
09:00 a.m.	3.2	1.7	0.4
09:30 a.m.	5.1	3	0.9
10:00 a.m.	5.7	3.5	0.5
10:30 a.m.	7.9	4.7	1.1
11:00 a.m.	8.7	4.1	0.3
11:30 a.m.	9.3	5.5	1.2
12:00 p.m.	10.7	4.7	0.9
12:30 p.m.	11	5.8	1.3
01:00 p.m.	11.1	5.7	0.3
01:30 p.m.	11.6	6.1	1
02:00 p.m.	10.9	5.7	0.4
02:30 p.m.	11.1	5.1	0.3
03:00 p.m.	11.3	5.7	0.3
03:30 p.m.	11.1	6.4	0.5
04:00 p.m.	11	5.4	0.4
04:30 p.m.	9.9	6	1.2
05:00 p.m.	8.6	4.8	1.1
05:30 p.m.	7.3	4.9	1.7
06:00 p.m.	6.1	4.5	1.8
06:30 p.m.	4.9	4.1	1.2
07:00 p.m.	3	2.3	0.6
07:30 p.m.	1.3	0.7	0.3
08:00 p.m.	0	0	0
08:30 p.m.	-0.3	-0.4	-0.7
09:00 p.m.	-0.5	-0.7	-0.9
09:30 p.m.	-0.7	-0.8	-1
10:00 p.m.	-0.3	-0.5	-0.7
10:30 p.m.	-0.5	-0.7	-0.9
11:00 p.m.	-0.4	-0.6	-0.8
11:30 p.m.	-0.5	-0.7	-0.9
12:00 a.m.	-0.4	-0.8	-1.4
12:30 a.m.	-0.4	-0.6	-1.1
01:00 a.m.	-0.2	-0.9	-1.7
01:30 a.m.	-0.5	-0.8	-1.7
02:00 a.m.	-0.4	-0.8	-1.7
02:30 a.m.	-0.4	-0.9	-1.5
03:00 a.m.	-0.4	-0.8	-1.4
03:30 a.m.	-0.4	-0.6	-1.1
04:00 a.m.	-0.8	-0.9	-1
04:30 a.m.	-1	-1.3	-1.5
05:00 a.m.	-1	-1.1	-1.3
05:30 a.m.	-0.9	-0.9	-1
06:00 a.m.	-1	-0.9	-0.8
06:30 a.m.	-1	-0.9	-0.8
07:00 a.m.	-1.1	-1	-0.9
07:30 a.m.	-1	-0.9	-0.8
08:00 a.m.	-0.4	-0.2	0.7

Tabla 6. Datos promedio de temperaturas del aire y el follaje para tres tratamientos de humedad en sustrato de tezontle con granulometría gruesa.

$\varnothing \geq 5\text{mm}$				
		75% Hum. Residual	45% Hum. Residual	15% Hum. Residual
Tiempo	Aire	T3 _(1,3)	T6 _(2,3)	T9 _(3,3)
Hrs	Temp °C	T°C. Follaje	T°C. Follaje	T°C. Follaje
08:00 a.m.	12.2	13.3	13.5	11.9
08:30 a.m.	14.7	14.7	14.7	14.7
09:00 a.m.	18.2	15.3	16.8	17.5
09:30 a.m.	21.8	16.9	19.1	21.2
10:00 a.m.	25.2	19.6	23	24.9
10:30 a.m.	28	20.4	23.8	27
11:00 a.m.	30.3	22	26.2	30
11:30 a.m.	32.3	23	27	31.2
12:00 p.m.	33.7	23	28.8	33.4
12:30 p.m.	34.5	24.2	29	34.2
01:00 p.m.	35.1	24	29.7	34.8
01:30 p.m.	35.1	24.1	29.3	34.5
02:00 p.m.	35.2	24.5	29.5	34.8
02:30 p.m.	35.1	24.6	30	34.9
03:00 p.m.	34.8	23.7	29.2	34.7
03:30 p.m.	34.8	23.8	29.3	34.3
04:00 p.m.	34	24	28.8	33.7
04:30 p.m.	33	23.3	27.5	31.8
05:00 p.m.	31.1	22.8	26.5	30.2
05:30 p.m.	28.5	20.6	23.8	26.7
06:00 p.m.	26.3	19.8	22	24.5
06:30 p.m.	24.9	19.7	21.1	23.8
07:00 p.m.	22.8	19.6	20.7	22
07:30 p.m.	20.9	19.4	20.3	20.6
08:00 p.m.	19.2	19.2	19.2	19.2
08:30 p.m.	17.9	18.6	18.8	19
09:00 p.m.	16.9	18	18.4	18.7
09:30 p.m.	16.3	17.2	17.4	18
10:00 p.m.	15.9	16.7	17	17.5
10:30 p.m.	15.5	16.2	16.6	17
11:00 p.m.	15.2	15.8	16	16.5
11:30 p.m.	14.8	15.5	15.7	16
12:00 a.m.	14.4	15	15.4	15.7
12:30 a.m.	14.1	14.6	15.2	15.5
01:00 a.m.	13.9	14.3	15	15.4
01:30 a.m.	13.7	14	14.6	15.3
02:00 a.m.	13.5	13.7	14.5	15.4
02:30 a.m.	13.2	13.6	14.3	14.7
03:00 a.m.	13	13.5	13.7	14.5
03:30 a.m.	12.8	13.5	13.6	14
04:00 a.m.	12.6	13.5	13.5	13.6
04:30 a.m.	12.3	13.4	13.5	13.8
05:00 a.m.	12.1	13.3	13.4	13.2
05:30 a.m.	11.9	12.8	12.9	13
06:00 a.m.	11.7	12.7	12.6	12.5
06:30 a.m.	11.6	12.6	12.5	12.4
07:00 a.m.	11.4	12.4	12.3	12.2
07:30 a.m.	11.4	12.4	12.2	12.1
08:00 a.m.	12.2	13.3	13.5	11.9

Tabla 7. Datos promedio de diferencias de temperatura entre el aire y el follaje para tres tratamientos de humedad en sustrato de tezontle con granulometría gruesa.

$\varnothing \geq 5\text{mm}$			
Tiempo	T3 _(1,3)	T6 _(2,3)	T9 _(3,3)
hrs	(Ta-Tf)°C	(Ta-Tf)°C	(Ta-Tf)°C
08:00 a.m.	-1.1	-1.3	0.3
08:30 a.m.	0	0	0
09:00 a.m.	2.9	1.4	0.7
09:30 a.m.	4.9	2.7	0.6
10:00 a.m.	5.6	2.2	0.3
10:30 a.m.	7.6	4.2	1
11:00 a.m.	8.3	4.1	0.3
11:30 a.m.	9.3	5.3	1.1
12:00 p.m.	10.7	4.9	0.3
12:30 p.m.	10.3	5.5	0.3
01:00 p.m.	11.1	5.4	0.3
01:30 p.m.	11	5.8	0.6
02:00 p.m.	10.7	5.7	0.4
02:30 p.m.	10.5	5.1	0.2
03:00 p.m.	11.1	5.6	0.1
03:30 p.m.	11	5.5	0.5
04:00 p.m.	10	5.2	0.3
04:30 p.m.	9.7	5.5	1.2
05:00 p.m.	8.3	4.6	0.9
05:30 p.m.	7.9	4.7	1.8
06:00 p.m.	6.5	4.3	1.8
06:30 p.m.	5.2	3.8	1.1
07:00 p.m.	3.2	2.1	0.8
07:30 p.m.	1.5	0.6	0.3
08:00 p.m.	0	0	0
08:30 p.m.	-0.7	-0.9	-1.1
09:00 p.m.	-1.1	-1.5	-1.8
09:30 p.m.	-0.9	-1.1	-1.7
10:00 p.m.	-0.8	-1.1	-1.6
10:30 p.m.	-0.7	-1.1	-1.5
11:00 p.m.	-0.6	-0.8	-1.3
11:30 p.m.	-0.7	-0.9	-1.2
12:00 a.m.	-0.6	-1	-1.3
12:30 a.m.	-0.5	-1.1	-1.4
01:00 a.m.	-0.4	-1.1	-1.5
01:30 a.m.	-0.3	-0.9	-1.6
02:00 a.m.	-0.2	-1	-1.9
02:30 a.m.	-0.4	-1.1	-1.5
03:00 a.m.	-0.5	-0.7	-1.5
03:30 a.m.	-0.7	-0.8	-1.2
04:00 a.m.	-0.9	-0.9	-1
04:30 a.m.	-1.1	-1.2	-1.5
05:00 a.m.	-1.2	-1.3	-1.1
05:30 a.m.	-0.9	-1	-1.1
06:00 a.m.	-1	-0.9	-0.8
06:30 a.m.	-1	-0.9	-0.8
07:00 a.m.	-1	-0.9	-0.8
07:30 a.m.	-1	-0.8	-0.7
08:00 a.m.	-1.1	-1.3	0.3

Tabla 8. Requerimiento y frecuencia de riego para el tratamiento de humedad T1 (100-75% de humedad) en tezontle fino

Fecha	Ø ≤ 2mm	Fecha	Ø ≤ 2mm	Fecha	Ø ≤ 2mm
	Horario de Aplicación de Req. Rgo Lr = 0.5248 cm		Horario de Aplicación de Req. Rgo 0.5248mm		Horario de Aplicación de Req. Rgo Lr = 0.5248 cm
28/05/2007	03:00 p.m.	15/06/2007	03:00 p.m.	07/07/2007	01:00 p.m.
28/05/2007	07:00 p.m.	15/06/2007	07:00 p.m.	07/07/2007	03:00 p.m.
29/05/2007	09:00 a.m.	16/06/2007	01:00 p.m.	08/07/2007	10:00 a.m.
29/05/2007	12:00 p.m.	16/06/2007	04:00 p.m.	08/07/2007	01:00 p.m.
29/05/2007	02:00 p.m.	17/06/2007	09:00 a.m.	08/07/2007	04:00 p.m.
29/05/2007	04:00 p.m.	17/06/2007	12:00 p.m.	09/07/2007	10:00 a.m.
30/05/2007	08:00 a.m.	17/06/2007	01:00 p.m.	09/07/2007	01:00 p.m.
30/05/2007	12:00 p.m.	17/06/2007	04:00 p.m.	09/07/2007	03:00 p.m.
30/05/2007	02:00 p.m.	18/06/2007	11:00 a.m.	10/07/2007	10:00 a.m.
30/05/2007	04:00 p.m.	18/06/2007	01:00 p.m.	10/07/2007	02:00 p.m.
31/05/2007	10:00 a.m.	18/06/2007	02:00 p.m.	10/07/2007	06:00 p.m.
31/05/2007	12:00 p.m.	18/06/2007	06:00 p.m.	11/07/2007	11:00 a.m.
31/05/2007	02:00 p.m.	19/06/2007	11:00 a.m.	11/07/2007	02:00 p.m.
31/05/2007	05:00 p.m.	19/06/2007	01:00 p.m.	11/07/2007	06:00 p.m.
01/06/2007	10:00 a.m.	19/06/2007	02:00 p.m.	12/07/2007	12:00 p.m.
01/06/2007	12:00 p.m.	19/06/2007	06:00 p.m.	12/07/2007	03:00 p.m.
01/06/2007	02:00 p.m.	20/06/2007	12:00 p.m.	12/07/2007	07:00 p.m.
01/06/2007	05:00 p.m.	20/06/2007	02:00 p.m.	13/07/2007	12:00 p.m.
02/06/2007	11:00 a.m.	21/06/2007	10:00 a.m.	13/07/2007	03:00 p.m.
02/06/2007	01:00 p.m.	21/06/2007	01:00 p.m.	14/07/2007	10:00 a.m.
02/06/2007	02:00 p.m.	21/06/2007	05:00 p.m.	14/07/2007	01:00 p.m.
02/06/2007	05:00 p.m.	22/06/2007	11:00 a.m.	14/07/2007	03:00 p.m.
03/06/2007	11:00 a.m.	22/06/2007	01:00 p.m.	15/07/2007	09:00 a.m.
03/06/2007	01:00 p.m.	22/06/2007	02:00 p.m.	15/07/2007	12:00 p.m.
03/06/2007	02:00 p.m.	22/06/2007	05:00 p.m.	15/07/2007	02:00 p.m.
03/06/2007	05:00 p.m.	23/06/2007	11:00 a.m.	15/07/2007	07:00 p.m.
04/06/2007	11:00 a.m.	23/06/2007	01:00 p.m.	16/07/2007	11:00 a.m.
04/06/2007	01:00 p.m.	23/06/2007	02:00 p.m.	16/07/2007	04:00 p.m.
04/06/2007	02:00 p.m.	23/06/2007	06:00 p.m.	17/07/2007	11:00 a.m.
04/06/2007	05:00 p.m.	24/06/2007	12:00 p.m.	17/07/2007	07:00 p.m.
05/06/2007	11:00 a.m.	24/06/2007	02:00 p.m.	18/07/2007	11:00 a.m.
05/06/2007	01:00 p.m.	24/06/2007	06:00 p.m.	18/07/2007	02:00 p.m.
05/06/2007	03:00 p.m.	25/06/2007	12:00 p.m.	18/07/2007	07:00 p.m.
06/06/2007	10:00 a.m.	25/06/2007	02:00 p.m.	19/07/2007	11:00 a.m.
06/06/2007	12:00 p.m.	25/06/2007	05:00 p.m.	19/07/2007	03:00 p.m.
06/06/2007	01:00 p.m.	26/06/2007	11:00 a.m.	19/07/2007	07:00 p.m.
06/06/2007	03:00 p.m.	26/06/2007	01:00 p.m.	20/07/2007	11:00 a.m.
07/06/2007	09:00 a.m.	26/06/2007	03:00 p.m.	20/07/2007	03:00 p.m.
07/06/2007	12:00 p.m.	27/06/2007	10:00 a.m.	21/07/2007	11:00 a.m.
07/06/2007	01:00 p.m.	27/06/2007	12:00 p.m.	21/07/2007	01:00 p.m.
07/06/2007	03:00 p.m.	27/06/2007	02:00 p.m.	21/07/2007	07:00 p.m.
08/06/2007	09:00 a.m.	27/06/2007	06:00 p.m.	22/07/2007	10:00 a.m.
08/06/2007	12:00 p.m.	28/06/2007	11:00 a.m.	22/07/2007	04:00 p.m.
08/06/2007	01:00 p.m.	28/06/2007	01:00 p.m.	23/07/2007	11:00 a.m.
08/06/2007	04:00 p.m.	28/06/2007	04:00 p.m.	23/07/2007	03:00 p.m.
09/06/2007	10:00 a.m.	28/06/2007	11:00 p.m.	24/07/2007	08:00 a.m.
09/06/2007	12:00 p.m.	29/06/2007	12:00 p.m.	24/07/2007	12:00 p.m.
09/06/2007	01:00 p.m.	29/06/2007	02:00 p.m.	24/07/2007	05:00 p.m.
09/06/2007	04:00 p.m.	29/06/2007	07:00 p.m.	25/07/2007	11:00 a.m.
10/06/2007	10:00 a.m.	30/06/2007	12:00 p.m.	25/07/2007	02:00 p.m.
10/06/2007	01:00 p.m.	30/06/2007	02:00 p.m.	26/07/2007	11:00 a.m.
10/06/2007	05:00 p.m.	30/06/2007	07:00 p.m.	26/07/2007	02:00 p.m.
11/06/2007	11:00 a.m.	01/07/2007	12:00 p.m.	27/07/2007	09:00 a.m.
11/06/2007	12:00 p.m.	01/07/2007	02:00 p.m.	27/07/2007	12:00 p.m.
11/06/2007	03:00 p.m.	01/07/2007	07:00 p.m.	27/07/2007	03:00 p.m.
11/06/2007	10:00 p.m.	02/07/2007	02:00 p.m.	28/07/2007	09:00 a.m.
12/06/2007	12:00 a.m.	02/07/2007	07:00 p.m.	28/07/2007	01:00 p.m.
12/06/2007	11:00 a.m.	03/07/2007	12:00 p.m.	28/07/2007	03:00 p.m.
12/06/2007	01:00 p.m.	03/07/2007	02:00 p.m.	29/07/2007	10:00 a.m.
12/06/2007	03:00 p.m.	04/07/2007	08:00 a.m.	29/07/2007	12:00 p.m.
13/06/2007	11:00 a.m.	04/07/2007	12:00 p.m.	29/07/2007	02:00 p.m.
13/06/2007	01:00 p.m.	04/07/2007	02:00 p.m.	29/07/2007	06:00 p.m.
13/06/2007	04:00 p.m.	05/07/2007	08:00 a.m.	29/07/2007	11:00 p.m.

Tabla 8. Continuación.

14/06/2007	10:00 a.m.	05/07/2007	12:00 p.m.	30/07/2007	12:00 p.m.
14/06/2007	12:00 p.m.	05/07/2007	04:00 p.m.	30/07/2007	02:00 p.m.
14/06/2007	02:00 p.m.	06/07/2007	10:00 a.m.	30/07/2007	05:00 p.m.
14/06/2007	07:00 p.m.	06/07/2007	01:00 p.m.	31/07/2007	12:00 p.m.
15/06/2007	11:00 a.m.	06/07/2007	03:00 p.m.	31/07/2007	02:00 p.m.
15/06/2007	01:00 p.m.	07/07/2007	10:00 a.m.	31/07/2007	04:00 p.m.
31/07/2007	04:00 p.m.	16/08/2007	11:00 a.m.	05/09/2007	01:00 p.m.
01/08/2007	11:00 a.m.	16/08/2007	02:00 p.m.	05/09/2007	03:00 p.m.
01/08/2007	01:00 p.m.	17/08/2007	10:00 a.m.	06/09/2007	11:00 a.m.
01/08/2007	04:00 p.m.	17/08/2007	12:00 p.m.	06/09/2007	01:00 p.m.
02/08/2007	11:00 a.m.	17/08/2007	02:00 p.m.	06/09/2007	06:00 p.m.
02/08/2007	02:00 p.m.	17/08/2007	06:00 p.m.	07/09/2007	07:00 p.m.
02/08/2007	04:00 p.m.	18/08/2007	12:00 p.m.	08/09/2007	12:00 p.m.
02/08/2007	07:00 p.m.	18/08/2007	03:00 p.m.	08/09/2007	02:00 p.m.
03/08/2007	12:00 p.m.	19/08/2007	10:00 a.m.	09/09/2007	09:00 a.m.
03/08/2007	02:00 p.m.	19/08/2007	01:00 p.m.	09/09/2007	05:00 p.m.
03/08/2007	07:00 p.m.	19/08/2007	04:00 p.m.	10/09/2007	01:00 p.m.
04/08/2007	12:00 p.m.	20/08/2007	12:00 p.m.	10/09/2007	07:00 p.m.
04/08/2007	03:00 p.m.	20/08/2007	03:00 p.m.	11/09/2007	04:00 p.m.
05/08/2007	09:00 a.m.	21/08/2007	10:00 a.m.	12/09/2007	12:00 p.m.
05/08/2007	12:00 p.m.	21/08/2007	01:00 p.m.	12/09/2007	04:00 p.m.
05/08/2007	02:00 p.m.	21/08/2007	03:00 p.m.	13/09/2007	11:00 a.m.
05/08/2007	04:00 p.m.	22/08/2007	11:00 a.m.	13/09/2007	02:00 p.m.
06/08/2007	10:00 a.m.	23/08/2007	03:00 p.m.	13/09/2007	05:00 p.m.
06/08/2007	01:00 p.m.	24/08/2007	12:00 p.m.	14/09/2007	11:00 a.m.
07/08/2007	10:00 a.m.	24/08/2007	02:00 p.m.	14/09/2007	02:00 p.m.
07/08/2007	02:00 p.m.	24/08/2007	06:00 p.m.	15/09/2007	09:00 a.m.
08/08/2007	09:00 a.m.	25/08/2007	12:00 p.m.	15/09/2007	12:00 p.m.
08/08/2007	12:00 p.m.	25/08/2007	03:00 p.m.	15/09/2007	02:00 p.m.
08/08/2007	02:00 p.m.	26/08/2007	11:00 a.m.	16/09/2007	10:00 a.m.
09/08/2007	09:00 a.m.	26/08/2007	01:00 p.m.	16/09/2007	12:00 p.m.
09/08/2007	12:00 p.m.	26/08/2007	04:00 p.m.	16/09/2007	02:00 p.m.
09/08/2007	02:00 p.m.	27/08/2007	10:00 a.m.	17/09/2007	09:00 a.m.
09/08/2007	05:00 p.m.	27/08/2007	12:00 p.m.	17/09/2007	12:00 p.m.
10/08/2007	12:00 p.m.	28/08/2007	10:00 a.m.	17/09/2007	02:00 p.m.
10/08/2007	02:00 p.m.	28/08/2007	01:00 p.m.	17/09/2007	04:00 p.m.
10/08/2007	04:00 p.m.	28/08/2007	03:00 p.m.	18/09/2007	11:00 a.m.
11/08/2007	09:00 a.m.	28/08/2007	06:00 p.m.	18/09/2007	01:00 p.m.
11/08/2007	12:00 p.m.	29/08/2007	12:00 p.m.	18/09/2007	05:00 p.m.
11/08/2007	03:00 p.m.	29/08/2007	03:00 p.m.	19/09/2007	12:00 p.m.
12/08/2007	12:00 p.m.	30/08/2007	11:00 a.m.	19/09/2007	02:00 p.m.
12/08/2007	02:00 p.m.	30/08/2007	02:00 p.m.	20/09/2007	09:00 a.m.
12/08/2007	04:00 p.m.	30/08/2007	06:00 p.m.	20/09/2007	01:00 p.m.
13/08/2007	10:00 a.m.	31/08/2007	03:00 p.m.	20/09/2007	04:00 p.m.
13/08/2007	12:00 p.m.	01/09/2007	01:00 p.m.	21/09/2007	11:00 a.m.
13/08/2007	02:00 p.m.	01/09/2007	06:00 p.m.	21/09/2007	01:00 p.m.
13/08/2007	06:00 p.m.	02/09/2007	01:00 p.m.	21/09/2007	04:00 p.m.
14/08/2007	11:00 a.m.	02/09/2007	03:00 p.m.	22/09/2007	10:00 a.m.
14/08/2007	01:00 p.m.	03/09/2007	11:00 a.m.	22/09/2007	01:00 p.m.
14/08/2007	04:00 p.m.	04/09/2007	11:00 a.m.	22/09/2007	03:00 p.m.
15/08/2007	10:00 a.m.	04/09/2007	01:00 p.m.	22/09/2007	06:00 p.m.
15/08/2007	01:00 p.m.	04/09/2007	03:00 p.m.	23/09/2007	12:00 p.m.
15/08/2007	03:00 p.m.	05/09/2007	11:00 a.m.	23/09/2007	02:00 p.m.
23/09/2007	05:00 p.m.	26/09/2007	09:00 a.m.	28/09/2007	03:00 p.m.
24/09/2007	11:00 a.m.	26/09/2007	12:00 p.m.	28/09/2007	06:30 p.m.
24/09/2007	01:00 p.m.	26/09/2007	02:00 p.m.	29/09/2007	11:00 a.m.
24/09/2007	03:00 p.m.	26/09/2007	04:00 p.m.	29/09/2007	03:00 p.m.
24/09/2007	05:30 p.m.	27/09/2007	10:00 a.m.	29/09/2007	04:00 p.m.
25/09/2007	11:00 a.m.	27/09/2007	04:00 p.m.	29/09/2007	06:00 p.m.
25/09/2007					
	01:00 p.m.	28/09/2007	11:00 a.m.	30/09/2007	01:00 p.m.
25/09/2007	03:00 p.m.	28/09/2007	01:00 p.m.		

Req.Rgo = Requerimiento de Riego.

Tabla 9. Lecturas del TDR de humedad del sustrato y de temperatura foliar registradas a las 14:00 p.m, para T1(100-75 % de Humedad Residual), con granulometría fina para una lámina de riego de 0.5228 cm.

T1(100-75% HUMEDAD RESIDUAL), Ø≤ 2mm, Lr = 0.5228 cm					
Fecha	Horario de lecturas	*Lectura a TDR	% Humedad en Sustrato	Temp Foliar °C	(Ta-Tf) °C
31/05/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	23.6	12.5
04/06/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	24.2	11.7
14/06/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	24.6	11.5
20/06/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	23.9	11.8
22/06/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	24.5	12.4
25/06/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	24.3	10.9
29/06/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	23.6	12.5
01/07/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	24.2	10.8
02/07/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	23.7	11.6
04/07/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	23.7	10.8
10/07/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	23.6	10.6
15/07/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	23.9	12.8
25/07/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	24.5	10.5
30/07/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	24	11.3
03/08/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	24.5	11.6
05/08/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	23.9	10.8
09/08/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	23.7	11.5
12/08/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	24.5	11.6
13/08/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	24.8	10.9
17/08/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	25.6	12.2
24/08/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	23.6	11.9
30/08/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	23.5	11.2
08/09/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	23.5	12.4
13/09/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	23.5	12.3
14/09/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	24.5	11.6
15/09/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	24.3	12.5
16/09/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	23.9	10.8
19/09/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	24.5	11.5
23/09/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	23.9	11.8
26/09/2007	14:00 p.m.	0.79433	75	24.8	12.8
				Promedio = 24.11 °C	Promedio =11.63 °C

* Este dato se refiere a la lectura de las pulsaciones eléctricas por minuto emitidas por el TDR y que de acuerdo a la calibración inicial realizada con este aparato corresponde a 75 % de humedad residual en el sustrato de granulometría fina.

Tabla 10. Lecturas del TDR de humedad del sustrato y de temperatura foliar registradas a las 14:00 p.m, para T4(100-45 % de Humedad Residual), con granulometría fina para una lámina de riego de 1.1563 cm.

T4(100-45% HUMEDAD RESIDUAL), $\phi \leq 2\text{mm}$, Lr =1.1563 cm					
Fecha	Horario de lecturas	Lect. TDR	% Humedad en Sustrato	Temp Foliar °C	(Ta-Tf) °C
07/06/2007	14:00 p.m.	0.74725	45	29.9	6.3
15/06/2007	14:00 p.m.	0.74725	45	30.5	6.8
18/06/2007	14:00 p.m.	0.74725	45	30.6	5.8
24/06/2007	14:00 p.m.	0.74725	45	29.5	6.1
30/06/2007	14:00 p.m.	0.74725	45	27.5	7.2
07/07/2007	14:00 p.m.	0.74725	45	28.5	6.9
29/07/2007	14:00 p.m.	0.74725	45	27.6	5.6
08/08/2007	14:00 p.m.	0.74725	45	29.9	6.3
16/08/2007	14:00 p.m.	0.74725	45	27.3	6.2
25/08/2007	14:00 p.m.	0.74725	45	28.2	6.7
09/09/2007	14:00 p.m.	0.74725	45	27.4	7.2
17/09/2007	14:00 p.m.	0.74725	45	27.9	6.9
				Promedio = 28.73 °C	Promedio= 6.5 °C

Tabla 11. Lecturas del TDR de humedad del sustrato y de temperatura foliar registradas a las 14:00 p.m, para T7(100-15 % de Humedad Residual), con granulometría fina para una lámina de riego de 1.7857 cm.

T7(100-15% HUMEDAD RESIDUAL), $\phi \leq 2\text{mm}$, Lr =1.7857 cm.					
Fecha	Horario de lecturas	Lect. TDR	% Humedad en Sustrato	Temp Foliar °C	(Ta-Tf) °C
06/06/2007	14:00 p.m.	0.73114	15	32.5	1.2
12/06/2007	14:00 p.m.	0.73114	15	33.2	1.4
26/06/2007	14:00 p.m.	0.73114	15	32.4	1.2
24/07/2007	14:00 p.m.	0.73114	15	34.8	1.4
02/08/2007	14:00 p.m.	0.73114	15	35.2	1.6
05/09/2007	14:00 p.m.	0.73114	15	35.5	1.6
20/09/2007	14:00 p.m.	0.73114	15	33.2	1.5
				Promedio = 33.82 °C	Promedio= 1.414 °C

Tabla 12. Lecturas del TDR de humedad del sustrato y de temperatura foliar registradas a las 14:00 p.m, para (PMP) T11(100-5 % de Humedad Residual), con granulometría fina para una lámina de riego de 2.099 cm.

T11(100-5% HUMEDAD RESIDUAL), Ø≤ 2mm, Lr =2.099 cm.					
Fecha	Horario de lecturas	Lect. TDR	% Humedad en Sustrato	Temp Foliar °C	(Ta-Tf) °C
07/06/2007	14:00 p.m.	0.72684	5	35	-0.4
30/06/2007	14:00 p.m.	0.72684	5	35.8	2
29/07/2007	14:00 p.m.	0.72684	5	34.8	1.4
08/08/2007	14:00 p.m.	0.72684	5	36	-1.5
17/08/2007	14:00 p.m.	0.72684	5	33.9	3.5
25/08/2007	14:00 p.m.	0.72684	5	36.9	-2.4
25/09/2007	14:00 p.m.	0.72684	5	35.5	0.1
				Promedio = 35.41 °C	Promedio= 0.4 °C

Tabla 13. Lecturas del TDR de humedad del sustrato y de temperatura foliar registradas a las 14:00 p.m, para (CC) T10(100-95% de Humedad Residual constante), con granulometría fina para una lámina de riego de 0-0.104 cm.

T10(100-95% HUMEDAD RESIDUAL), Ø≤ 2mm, Lr = 0- 0.104 cm.					
Fecha	Horario de lecturas	Lect. TDR	% Humedad en Sustrato	Temp Foliar °C	(Ta-Tf) °C
22/06/2007	14:00 p.m.	0.86005	100-95	20.3	16.6
25/06/2007	14:00 p.m.	0.86005	100-95	20.7	14.5
29/06/2007	14:00 p.m.	0.86005	100-95	20.6	15.5
01/07/2007	14:00 p.m.	0.86005	100-95	20.4	14.6
02/07/2007	14:00 p.m.	0.86005	100-95	20.2	15.1
04/07/2007	14:00 p.m.	0.86005	100-95	20.8	13.7
10/07/2007	14:00 p.m.	0.86005	100-95	19.5	14.7
15/07/2007	14:00 p.m.	0.86005	100-95	21.5	15.2
25/07/2007	14:00 p.m.	0.86005	100-95	19.8	15.2
30/07/2007	14:00 p.m.	0.86005	100-95	21.2	14.1
03/08/2007	14:00 p.m.	0.86005	100-95	20	16.1
05/08/2007	14:00 p.m.	0.86005	100-95	21	13.7
09/08/2007	14:00 p.m.	0.86005	100-95	19.2	16
12/08/2007	14:00 p.m.	0.86005	100-95	21.8	14.3
13/08/2007	14:00 p.m.	0.86005	100-95	19	16.7
17/08/2007	14:00 p.m.	0.86005	100-95	22	15.8
24/08/2007	14:00 p.m.	0.86005	100-95	20.7	14.8
30/08/2007	14:00 p.m.	0.86005	100-95	20.3	14.4
08/09/2007	14:00 p.m.	0.86005	100-95	20.4	15.5
13/09/2007	14:00 p.m.	0.86005	100-95	20.6	15.2
				Promedio = 20.5 °C	Promedio= 15 °C

Tabla 14. Cálculo del DAP para los datos observados y estimados de (Ta-Tf) en función del % de déficit de humedad.

	$\varnothing \leq 2\text{mm}$	$\varnothing \leq 2\text{mm}$	$\varnothing 2 \text{ a } 5\text{mm}$	$\varnothing 2 \text{ a } 5\text{mm}$	$\varnothing \geq 5\text{mm}$	$\varnothing \geq 5\text{mm}$
	(Ta-Tf) $^{\circ}\text{C}$	(Ta-Tf) $^{\circ}\text{C}$	(Ta-Tf) $^{\circ}\text{C}$	(Ta-Tf) $^{\circ}\text{C}$	(Ta-Tf) $^{\circ}\text{C}$	(Ta-Tf) $^{\circ}\text{C}$
% Déficit Humedad de calibración	Observada	Estimada	Observada	Estimada	Observada	Estimada
100(PMP)	0.1	0.1				
85(15%HRE)	1.4	1.9	0.3	0.2	0.1	0.2
55(45%HRE)	6.5	6.6	4.7	5	4.2	4.9
25(75%HRE)	11.6	11.3	10	9.9	10.3	10
0(CC)	15	15.1				
DAP	8.1011244		13.572104		39.85976267	

Tabla 15. Cálculo del DAP para los datos observados y estimados del % de Déficit de humedad en función de (Ta-Tf)

	$\varnothing \leq 2\text{mm}$	$\varnothing 2 \text{ a } 5\text{mm}$	$\varnothing \geq 5\text{mm}$
% Déficit Humedad De calibración	% Déficit Humedad Estimado	% Déficit Humedad Estimado	% Déficit Humedad Estimado
100(PMP)	99.9		
85(15%HRE)	85.2	96.1	98.7
55(45%HRE)	54.9	65.2	65.9
25(75%HRE)	24.7	33.7	33.1
0(CC)	0.3		
DAP	0.3434224	22.13475967	22.77860967

DAP = Desviación Absoluta Promedio.

Tabla 16. Cálculo del DAP para los datos observados y estimados del % de Déficit de humedad en función de la temperatura foliar.

	$\varnothing \leq 2\text{mm}$	$\varnothing 2 \text{ a } 5\text{mm}$	$\varnothing \geq 5\text{mm}$
% Déficit Hum De calibración	% Déficit Hum Estimado	% Déficit Hum Estimado	% Déficit Hum Estimado
100(PMP)	100.2	112.6	112
85(15%HRE)	85.1	95.6	94.9
55(45%HRE)	55.0	60.9	60.9
25(75%HRE)	24.8	26.8	27.4
0(CC)	0.1	0.1	0.1
DAP	0.2235294	10.1326203	10.6581105

DAP = Desviación Absoluta Promedio.

Tabla 17. Prueba de medias para diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf).
Mediante el método de la diferencia mínima significativa modificada (DMS).

$\bar{T}_i - \bar{T}_j$	$\bar{Y}_i - \bar{Y}_j$ (diferencia de medias)	Intervalo de confianza
$\bar{T}_1 - \bar{T}_2$	1.6	(0.08395859, 3.11604141)**
$\bar{T}_1 - \bar{T}_3$	1.2	(-0.31604141, 2.71604141)*
$\bar{T}_1 - \bar{T}_4$	5.1	(3.58395859, 6.61604141)**
$\bar{T}_1 - \bar{T}_5$	6.9	(5.38395859, 8.41604141)**
$\bar{T}_1 - \bar{T}_6$	7.3	(5.78395859, 8.81604141)**
$\bar{T}_1 - \bar{T}_7$	10.2	(8.68395859, 11.71604141)**
$\bar{T}_1 - \bar{T}_8$	11.3	(9.78395859, 12.81604141)**
$\bar{T}_1 - \bar{T}_9$	11.37	(9.85395859, 12.88604141)**
$\bar{T}_1 - \bar{T}_{10}$	-3.4	(-4.91604141, -1.88395859)**
$\bar{T}_1 - \bar{T}_{11}$	11.47	(9.95395859, 12.98604141)**
$\bar{T}_2 - \bar{T}_3$	-0.4	(-1.91604141, 1.11604141)*
$\bar{T}_2 - \bar{T}_4$	3.5	(1.98395859, 5.01604141)**
$\bar{T}_2 - \bar{T}_5$	5.3	(3.78395859, 6.81604141)**
$\bar{T}_2 - \bar{T}_6$	5.7	(4.18395859, 7.21604141)**
$\bar{T}_2 - \bar{T}_7$	8.6	(7.08395859, 10.11604141)**
$\bar{T}_2 - \bar{T}_8$	9.7	(8.18395859, 11.21604141)**
$\bar{T}_2 - \bar{T}_9$	9.77	(8.25395859, 11.28604141)**
$\bar{T}_2 - \bar{T}_{10}$	-5	(-6.51604141, -3.48395859)**
$\bar{T}_2 - \bar{T}_{11}$	9.87	(8.35395859, 11.38604141)**
$\bar{T}_3 - \bar{T}_4$	3.9	(2.38395859, 5.41604141)**
$\bar{T}_3 - \bar{T}_5$	5.7	(4.18395859, 7.21604141)**
$\bar{T}_3 - \bar{T}_6$	6.1	(4.58395859, 7.61604141)**
$\bar{T}_3 - \bar{T}_7$	9	(7.48395859, 10.51604141)**
$\bar{T}_3 - \bar{T}_8$	10.1	(8.58395859, 11.61604141)**
$\bar{T}_3 - \bar{T}_9$	10.17	(8.65395859, 11.68604141)**
$\bar{T}_3 - \bar{T}_{10}$	-4.6	(-6.11604141, -3.08395859)**
$\bar{T}_3 - \bar{T}_{11}$	10.27	(8.75395859, 11.78604141)**
$\bar{T}_4 - \bar{T}_5$	1.8	(0.28395859, 3.31604141)**
$\bar{T}_4 - \bar{T}_6$	2.2	(0.68395859, 3.71604141)**
$\bar{T}_4 - \bar{T}_7$	5.1	(3.58395859, 6.61604141)**
$\bar{T}_4 - \bar{T}_8$	6.2	(4.68395859, 7.71604141)**
$\bar{T}_4 - \bar{T}_9$	6.27	(4.75395859, 7.78604141)**
$\bar{T}_4 - \bar{T}_{10}$	-8.5	(-10.01604141, -6.98395859)**
$\bar{T}_4 - \bar{T}_{11}$	6.37	(4.85395859, 7.88604141)**
$\bar{T}_5 - \bar{T}_6$	0.4	(-1.11604141, 1.91604141)*
$\bar{T}_5 - \bar{T}_7$	3.3	(1.78395859, 4.81604141)**
$\bar{T}_5 - \bar{T}_8$	4.4	(2.88395859, 5.91604141)**
$\bar{T}_5 - \bar{T}_9$	4.47	(2.95395859, 5.98604141)**
$\bar{T}_5 - \bar{T}_{10}$	-10.3	(-11.81604141, -8.78395859)**
$\bar{T}_5 - \bar{T}_{11}$	4.57	(3.05395859, 6.08604141)**
$\bar{T}_6 - \bar{T}_7$	2.9	(1.38395859, 4.41604141)**
$\bar{T}_6 - \bar{T}_8$	4	(2.48395859, 5.51604141)**
$\bar{T}_6 - \bar{T}_9$	4.07	(2.55395859, 5.58604141)**
$\bar{T}_6 - \bar{T}_{10}$	-10.7	(-12.21604141, -9.18395859)**
$\bar{T}_6 - \bar{T}_{11}$	4.17	(2.65395859, 5.68604141)**
$\bar{T}_7 - \bar{T}_8$	1.1	(-0.41604141, 2.61604141)*
$\bar{T}_7 - \bar{T}_9$	1.17	(-0.34604141, 2.68604141)*
$\bar{T}_7 - \bar{T}_{10}$	-13.6	(-15.11604141, -12.08395859)**
$\bar{T}_7 - \bar{T}_{11}$	1.27	(-0.24604141, 2.78604141)*
$\bar{T}_8 - \bar{T}_9$	0.07	(-1.44604141, 1.58604141)*
$\bar{T}_8 - \bar{T}_{10}$	-14.7	(-16.21604141, -13.18395859)**
$\bar{T}_8 - \bar{T}_{11}$	0.17	(-1.34604141, 1.68604141)*
$\bar{T}_9 - \bar{T}_{10}$	-14.77	(-16.28604141, -13.25395859)**
$\bar{T}_9 - \bar{T}_{11}$	0.1	(-1.41604141, 1.61604141)*
$\bar{T}_{10} - \bar{T}_{11}$	14.87	(13.35395859, 16.38604141)**

$\bar{T}_i - \bar{T}_j$ = Contrastes entre medias de tratamientos.

* = Tratamientos con contrastes o efectos no significativos para un nivel de confianza del 6 %
ó $\alpha = 0.06$

** = Tratamientos con efectos distintos o significativos para un nivel de confianza del 6 % ó $\alpha = 0.06$

Tabla 18. Datos para análisis de varianza de (Ta-Tf) en°C.

Repeti- Ciones (Ta-Tf) en °C.	Tratamientos de % de déficit de humedad y diámetro de granulometría.											
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
1	11.6	10.0	10.5	6.5	4.3	4.2	1.4	0.3	0.1	14	0.1	
2	12.4	9.2	10.3	6.1	4.7	4.3	1.3	0.2	0.2	15	0.2	
3	10.8	10.8	10.6	6.9	5.1	4.4	1.5	0.4	0.4	16	0.1	

Tabla 19. Información de temperatura foliar (Tf), (Ta-Tf) y evapotranspiración acumulada (Et), utilizada en el cálculo del calendario y frecuencia de riego para el tratamiento T1, 75 % humedad residual, $\phi \leq 2\text{mm}$. Datos iniciales del experimento del 28 de mayo al primero de junio de 2007.

Fecha	Hora	Tf °C	(Ta-Tf) °C	ET(acum) cm
28/05/2007	03:00 p.m.	24.1	11.6	0.52
28/05/2007	07:00 p.m.	23.6	11.5	1.04
29/05/2007	09:00 a.m.	24	11.7	1.57
29/05/2007	12:00 p.m.	25	11.7	2.09
29/05/2007	02:00 p.m.	25.2	11.8	2.62
29/05/2007	04:00 p.m.	24.8	11.6	2.87
30/05/2007	08:00 a.m.	23.8	11.6	3.4
30/05/2007	12:00 p.m.	24.7	11.4	3.92
30/05/2007	02:00 p.m.	24.5	11.3	4.45
30/05/2007	04:00 p.m.	24.5	11.9	4.97
31/05/2007	10:00 a.m.	24.1	11.5	5.5
31/05/2007	12:00 p.m.	24.6	11.4	6.02
31/05/2007	02:00 p.m.	24.5	11.6	6.55
31/05/2007	05:00 p.m.	24.2	11.7	7.07
01/06/2007	10:00 a.m.	24.1	11.6	7.6
01/06/2007	12:00 p.m.	24.3	11.4	8.12

Tabla 20. Información de temperatura foliar (Tf), (Ta-Tf) y evapotranspiración acumulada (Et), utilizada en el cálculo del calendario y frecuencia de riego para el tratamiento T4, 45 % humedad residual, $\phi \leq 2\text{mm}$. Datos iniciales del experimento del 29 de mayo al 18 de junio de 2007.

Fecha	Hora	Tf °C	(Ta-Tf) °C	ET(acum) cm
29/05/2007	03:00 p.m.	28.7	6.5	1.15
31/05/2007	09:00 a.m.	27.4	6.7	2.31
01/06/2007	12:00 p.m.	28.5	6.4	3.46
02/06/2007	01:00 p.m.	28.9	6.6	4.62
03/06/2007	03:00 p.m.	27.8	6.5	5.78
05/06/2007	10:00 a.m.	27.6	6.5	6.93
06/06/2007	12:00 p.m.	28.2	6.3	8.09
07/06/2007	01:00 p.m.	27.9	6.6	9.25
08/06/2007	04:00 p.m.	28.3	6.8	10.4
10/06/2007	11:00 a.m.	27.8	6.3	11.56
11/06/2007	03:00 p.m.	28.5	6.4	12.71
12/06/2007	03:00 p.m.	28.3	6.5	13.87
14/06/2007	12:00 p.m.	29	6.6	15.03
15/06/2007	02:00 p.m.	29.2	6.7	16.18
17/06/2007	11:00 a.m.	28.7	6.5	17.34
18/06/2007	02:00 p.m.	28.8	6.6	18.5

Tabla 21. Información de temperatura foliar (Tf), (Ta-Tf) y evapotranspiración acumulada (Et), utilizada en el cálculo del calendario y frecuencia de riego para el tratamiento T7, 15 % humedad residual, $\phi \leq 2\text{mm}$. Datos iniciales del experimento del 31 de mayo al 24 de julio de 2007.

Fecha	Hora	Tf °C	(Ta-Tf) °C	ET(acum) cm
31/05/2007	01:00 p.m.	35.4	1.4	1.78
03/06/2007	01:00 p.m.	35.7	1.5	3.56
06/06/2007	01:00 p.m.	35.2	1.3	5.34
09/06/2007	01:00 p.m.	35	1.4	7.12
12/06/2007	01:00 p.m.	34.8	1.2	8.9
16/06/2007	09:00 a.m.	34.6	1.3	10.68
19/06/2007	12:00 p.m.	34.9	1.4	12.46
23/06/2007	09:00 a.m.	35	1.5	14.24
26/06/2007	01:00 p.m.	35.7	1.5	16.02
28/06/2007	06:00 p.m.	35.4	1.4	17.8
03/07/2007	11:00 a.m.	35.2	1.3	19.58
07/07/2007	11:00 a.m.	34.9	1.5	21.36
11/07/2007	12:00 p.m.	36	1.3	23.14
15/07/2007	12:00 p.m.	35.3	1.6	24.92
19/07/2007	04:00 p.m.	35.2	1.5	26.7
24/07/2007	01:00 p.m.	35.4	1.5	28.48

Tabla 22. Temperaturas promedio del aire y el follaje para tratamientos de humedad extrema con granulometría fina $\phi \leq 2\text{mm}$.

Horario	T. Aire, °C	CC.T°C.Follaje	PMP.T°C.Follaje
02:30a.m.	13.2	16.3	15.9
03:00a.m.	13	16	15.5
03:30a.m.	12.8	15.9	15
04:00a.m.	12.6	15.5	14.5
04:30a.m.	12.3	15.4	14.3
05:00a.m.	12.1	15.3	14
05:30a.m.	11.9	15.2	13.2
06:00a.m.	11.7	15	13.1
06:30a.m.	11.6	15.1	13
07:00a.m.	11.4	15	12.5
07:30a.m.	11.4	14.4	12.4
08:00a.m.	12.2	14.6	13.5
08:30a.m.	14.7	14.7	14.7
09:00a.m.	18.2	14.9	18
09:30a.m.	21.8	15.7	21.5
10:00a.m.	25.2	16.5	25.4
10:30a.m.	28	17	28.2
11:00a.m.	30.3	18.2	30
11:30a.m.	32.3	19.6	32
12:00p.m.	33.7	20.3	33.9
12:30p.m.	34.5	20.3	34
01:00p.m.	35.1	20.4	35.3
01:30p.m.	35.1	20.4	35
02:00p.m.	35.2	20.5	35.4
02:30p.m.	35.1	20.5	34.9
03:00p.m.	34.8	20.5	35.2
03:30p.m.	34.8	20.4	35
04:00p.m.	34	20.4	33.8
04:30p.m.	33	20.3	32.8
05:00p.m.	31.1	20.3	31
05:30p.m.	28.5	20.2	28.7
06:00p.m.	26.3	19.8	26
06:30p.m.	24.9	19.5	25
07:00p.m.	22.8	19	23
07:30p.m.	20.9	19	21
08:00p.m.	19.2	18.5	19
08:30p.m.	17.9	18.4	17.6
09:00p.m.	16.9	18	17.5
09:30p.m.	16.3	17.7	17
10:00p.m.	15.9	17.6	16.8
10:30p.m.	15.5	17.5	16.5
11:00p.m.	15.2	17.3	16.4
11:30p.m.	14.8	17.1	16.3
12:00a.m.	14.4	17	16.2
12:30a.m.	14.1	16.8	16
01:00a.m.	13.9	16.7	16.3
01:30a.m.	13.7	16.5	16.1
02:00a.m.	13.5	16.5	16.2
02:30a.m.	13.2	16.3	15.9

9Tabla 23. Temperaturas promedio del aire, el follaje (Tf) y (Ta-Tf) para tratamientos de humedad extrema con granulometría fina $\phi \leq 2\text{mm}$.

Horario	T. Aire, °C	CC.T°C.Follaje	PMP.T°C.Follaje	CC. (Ta-Tf) °C	PMP. (Ta-Tf) °C
02:30a.m.	13.2	16.3	15.9	-3.1	-2.7
03:00a.m.	13	16	15.5	-3	-2.5
03:30a.m.	12.8	15.9	15	-3.1	-2.2
04:00a.m.	12.6	15.5	14.5	-2.9	-1.9
04:30a.m.	12.3	15.4	14.3	-3.1	-2
05:00a.m.	12.1	15.3	14	-3.2	-1.9
05:30a.m.	11.9	15.2	13.2	-3.3	-1.3
06:00a.m.	11.7	15	13.1	-3.3	-1.4
06:30a.m.	11.6	15.1	13	-3.5	-1.4
07:00a.m.	11.4	15	12.5	-3.6	-1.1
07:30a.m.	11.4	14.4	12.4	-3	-1
08:00a.m.	12.2	14.6	13.5	-2.4	-1.3
08:30a.m.	14.7	14.7	14.7	0	0
09:00a.m.	18.2	14.9	18	3.3	0.2
09:30a.m.	21.8	15.7	21.5	6.1	0.3
10:00a.m.	25.2	16.5	25.4	8.7	-0.2
10:30a.m.	28	17	28.2	11	-0.2
11:00a.m.	30.3	18.2	30	12.1	0.3
11:30a.m.	32.3	19.6	32	12.7	0.3
12:00p.m.	33.7	20.3	33.9	13.4	-0.2
12:30p.m.	34.5	20.3	34	14.2	0.5
01:00p.m.	35.1	20.4	35.3	14.7	-0.2
01:30p.m.	35.1	20.4	35	14.7	0.1
02:00p.m.	35.2	20.5	35.4	14.7	-0.2
02:30p.m.	35.1	20.5	34.9	14.6	0.2
03:00p.m.	34.8	20.5	35.2	14.3	-0.4
03:30p.m.	34.8	20.4	35	14.4	-0.2
04:00p.m.	34	20.4	33.8	13.6	0.2
04:30p.m.	33	20.3	32.8	12.7	0.2
05:00p.m.	31.1	20.3	31	10.8	0.1
05:30p.m.	28.5	20.2	28.7	8.3	-0.2
06:00p.m.	26.3	19.8	26	6.5	0.3
06:30p.m.	24.9	19.5	25	5.4	-0.1
07:00p.m.	22.8	19	23	3.8	-0.2
07:30p.m.	20.9	19	21	1.9	-0.1
08:00p.m.	19.2	18.5	19	0.7	0.2
08:30p.m.	17.9	18.4	17.6	-0.5	0.3
09:00p.m.	16.9	18	17.5	-1.1	-0.6
09:30p.m.	16.3	17.7	17	-1.4	-0.7
10:00p.m.	15.9	17.6	16.8	-1.7	-0.9
10:30p.m.	15.5	17.5	16.5	-2	-1
11:00p.m.	15.2	17.3	16.4	-2.1	-1.2
11:30p.m.	14.8	17.1	16.3	-2.3	-1.5
12:00a.m.	14.4	17	16.2	-2.6	-1.8
12:30a.m.	14.1	16.8	16	-2.7	-1.9
01:00a.m.	13.9	16.7	16.3	-2.8	-2.4
01:30a.m.	13.7	16.5	16.1	-2.8	-2.4
02:00a.m.	13.5	16.5	16.2	-3	-2.7
02:30a.m.	13.2	16.3	15.9	-3.1	-2.7

Tabla 24. Prueba de medias para la variable: rendimiento de jitomate en Kg. Mediante el método de la diferencia mínima significativa modificada (DMS).

$\bar{r} - \bar{r}$	$\bar{Y}_r - \bar{Y}_r$ (diferencia de medias)	Intervalo de confianza
$\bar{r}_1 - \bar{r}_2$	0.02	(-0.175720104, 0.179720104)*
$\bar{r}_1 - \bar{r}_3$	0.96	(0.764279896, -0.760279896)**
$\bar{r}_1 - \bar{r}_4$	1.08	(0.884279896, -0.880279896)**
$\bar{r}_1 - \bar{r}_5$	1.42	(1.224279896, -1.220279896)**
$\bar{r}_1 - \bar{r}_6$	1.65	(1.454279896, -1.450279896)**
$\bar{r}_1 - \bar{r}_7$	2.13	(1.934279896, -1.930279896)**
$\bar{r}_1 - \bar{r}_8$	2.33	(2.134279896, -2.130279896)**
$\bar{r}_1 - \bar{r}_9$	2.43	(2.234279896, -2.230279896)**
$\bar{r}_1 - \bar{r}_{10}$	-0.03	(-0.225720104, 0.229720104)*
$\bar{r}_1 - \bar{r}_{11}$	2.82	(2.624279896, -2.620279896)**
$\bar{r}_2 - \bar{r}_3$	0.94	(0.744279896, -0.740279896)**
$\bar{r}_2 - \bar{r}_4$	1.06	(0.864279896, -0.860279896)**
$\bar{r}_2 - \bar{r}_5$	1.4	(1.204279896, -1.200279896)**
$\bar{r}_2 - \bar{r}_6$	1.63	(1.434279896, -1.430279896)**
$\bar{r}_2 - \bar{r}_7$	2.11	(1.914279896, -1.910279896)**
$\bar{r}_2 - \bar{r}_8$	2.31	(2.114279896, -2.110279896)**
$\bar{r}_2 - \bar{r}_9$	2.41	(2.214279896, -2.210279896)**
$\bar{r}_2 - \bar{r}_{10}$	-0.05	(-0.245720104, 0.249720104)*
$\bar{r}_2 - \bar{r}_{11}$	2.8	(2.604279896, -2.600279896)**
$\bar{r}_3 - \bar{r}_4$	0.12	(-0.075720104, 0.079720104)*
$\bar{r}_3 - \bar{r}_5$	0.46	(0.264279896, -0.260279896)**
$\bar{r}_3 - \bar{r}_6$	0.69	(0.494279896, -0.490279896)**
$\bar{r}_3 - \bar{r}_7$	1.17	(0.974279896, -0.970279896)**
$\bar{r}_3 - \bar{r}_8$	1.37	(1.174279896, -1.170279896)**
$\bar{r}_3 - \bar{r}_9$	1.47	(1.274279896, -1.270279896)**
$\bar{r}_3 - \bar{r}_{10}$	-0.99	(-1.185720104, 1.189720104)**
$\bar{r}_3 - \bar{r}_{11}$	1.86	(1.664279896, -1.660279896)**
$\bar{r}_4 - \bar{r}_5$	0.34	(0.144279896, -0.140279896)**
$\bar{r}_4 - \bar{r}_6$	0.57	(0.374279896, -0.370279896)**
$\bar{r}_4 - \bar{r}_7$	1.05	(0.854279896, -0.850279896)**
$\bar{r}_4 - \bar{r}_8$	1.25	(1.054279896, -1.050279896)**
$\bar{r}_4 - \bar{r}_9$	1.35	(1.154279896, -1.150279896)**
$\bar{r}_4 - \bar{r}_{10}$	-1.11	(-1.305720104, 1.309720104)**
$\bar{r}_4 - \bar{r}_{11}$	1.74	(1.544279896, -1.540279896)**
$\bar{r}_5 - \bar{r}_6$	0.23	(0.034279896, -0.030279896)**
$\bar{r}_5 - \bar{r}_7$	0.71	(0.514279896, -0.510279896)**
$\bar{r}_5 - \bar{r}_8$	0.91	(0.714279896, -0.710279896)**
$\bar{r}_5 - \bar{r}_9$	1.01	(0.814279896, -0.810279896)**
$\bar{r}_5 - \bar{r}_{10}$	-1.45	(-1.645720104, 1.649720104)**
$\bar{r}_5 - \bar{r}_{11}$	1.4	(1.204279896, -1.200279896)**
$\bar{r}_6 - \bar{r}_7$	0.48	(0.284279896, -0.280279896)**
$\bar{r}_6 - \bar{r}_8$	0.68	(0.484279896, -0.480279896)**
$\bar{r}_6 - \bar{r}_9$	0.78	(0.584279896, -0.580279896)**
$\bar{r}_6 - \bar{r}_{10}$	-1.68	(-1.875720104, 1.879720104)**
$\bar{r}_6 - \bar{r}_{11}$	1.17	(0.974279896, -0.970279896)**
$\bar{r}_7 - \bar{r}_8$	0.2	(0.004279896, -0.000279896)**
$\bar{r}_7 - \bar{r}_9$	0.3	(0.104279896, -0.100279896)**
$\bar{r}_7 - \bar{r}_{10}$	-2.16	(-2.355720104, 2.359720104)**
$\bar{r}_7 - \bar{r}_{11}$	0.69	(0.494279896, -0.490279896)**
$\bar{r}_8 - \bar{r}_9$	0.1	(-0.095720104, 0.099720104)*
$\bar{r}_8 - \bar{r}_{10}$	-2.36	(-2.555720104, 2.559720104)**
$\bar{r}_8 - \bar{r}_{11}$	0.49	(0.294279896, -0.290279896)**
$\bar{r}_9 - \bar{r}_{10}$	-2.46	(-2.655720104, 2.659720104)**
$\bar{r}_9 - \bar{r}_{11}$	0.39	(0.194279896, -0.190279896)**
$\bar{r}_{10} - \bar{r}_{11}$	2.85	(2.654279896, -2.650279896)**

$\bar{r} - \bar{r}$ = Contrastes entre medias de tratamientos.

* = Tratamientos con contrastes o efectos no significativos para un nivel de confianza del 6 % ó $\alpha = 0.06$

** = Tratamientos con efectos distintos o significativos para un nivel de confianza del 6 % ó $\alpha = 0.06$

Tabla 25. Datos para análisis de varianza de rendimiento de jitomate en Kg.

		Tratamientos de % de déficit de humedad y diámetro de granulometría.										
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
Repeticiones (Rendimiento) en Kg.	1	3.29	3.27	2.38	2.21	1.87	1.64	1.16	0.96	0.89	3.32	0.47
	2	3.22	3.33	2.33	2.25	1.82	1.71	1.13	0.94	0.86	3.38	0.49
	3	3.36	3.21	2.28	2.17	1.92	1.57	1.19	0.98	0.83	3.26	0.45

Tabla 26. Materiales empleados en la realización de la investigación.

NUM	MATERIALES EMPLEADOS.
1	Invernadero
2	Sistema de riego por goteo tipo espagueti
3	Estación agrometeorológica automática tipo Dávis.
4	Tanque evaporímetro tipo (A)
5	Calefactor casero
6	Ventilador estandar casero
7	Tezontle rojo
8	Sustrato húmico peat moss
9	Charolas semilleras de unicel blanco
10	Semilla de jitomate variedad cimabue (to-1482)
11	Cubetas de plastico capacidad 7 litros
12	Fertilizantes granulares hidrosolubles, foliares y fungicidas preventivos.
13	pH-metro manual (Potenciometro)
14	Equipo TDR medidor de humedad de sustrato
15	Termómetro de infrarrojo mod-51/52 ii.
16	Computadora personal pentium iii.
17	Bascula digital capacidad 10 kg.
18	Bascula digital de precisión capacidad 2 kg.
19	Hilo de rafia para tutoreo de plantas
20	Depósitos para solución nutritiva
21	Material de laboratorio variado(probetas, vasos precipitado), embudos, etc.
22	Bolsas plasticas y de papel para muestreos y cosecha
23	Etiquetas enceradas de papel
24	Verniers para medición de diámetros de frutos y tallos.
25	Reglas y flexómetros para medición de altura de planta y longitud de raíces
26	Camara digital
27	Integrador de área foliar
28	Horno de circulación de aire forzado para biomasa seca
29	Programa grow del c.p para registro de variables meteorológicas en tiempo real

APENDICE II

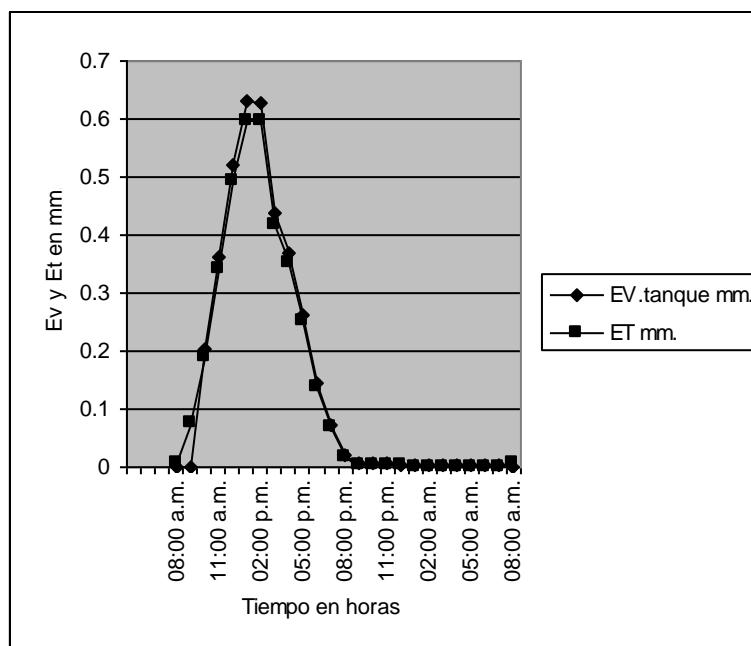


Fig. 1 Comportamiento de datos promedio de evapotranspiración (ET) y evaporación (EV) de mayo a septiembre de 2007 de la estación automática y tanque evaporímetro dentro del invernadero.

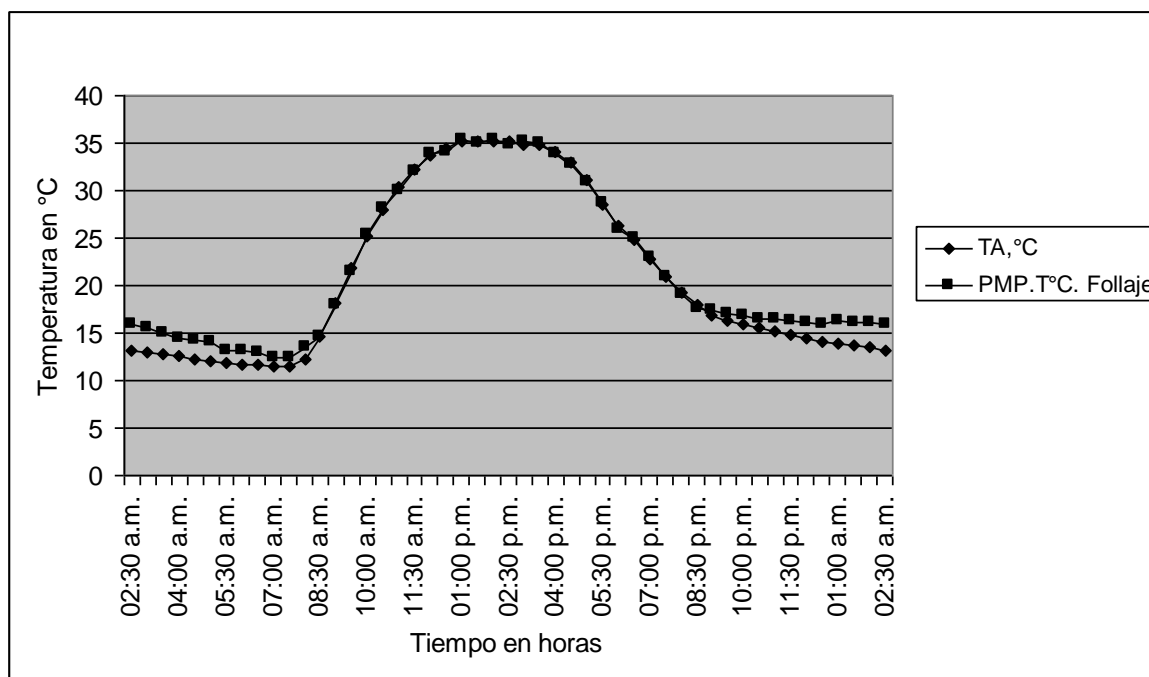


Fig. 2 Comportamiento de temperaturas promedio de mayo a septiembre de 2007 del aire y follaje para tratamiento control a PMP en tezontle granulometría fina.

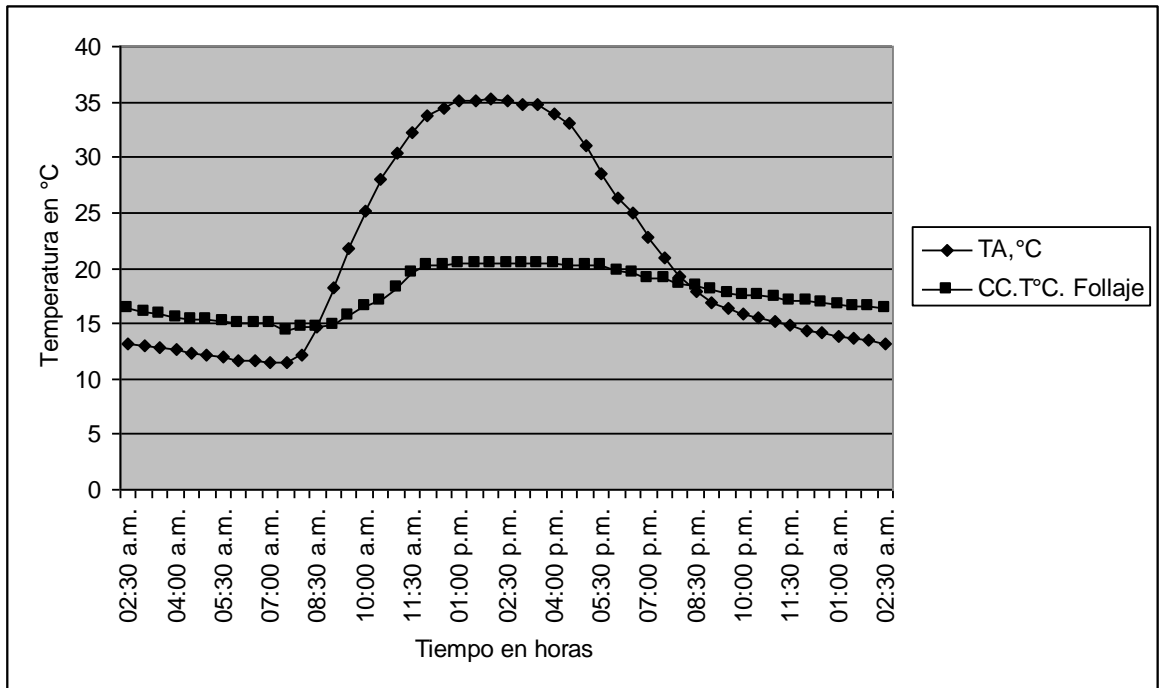


Fig. 3 Comportamiento de temperaturas promedio de mayo a septiembre de 2007 del aire y follaje para tratamiento control a CC en tezontle granulometría fina.

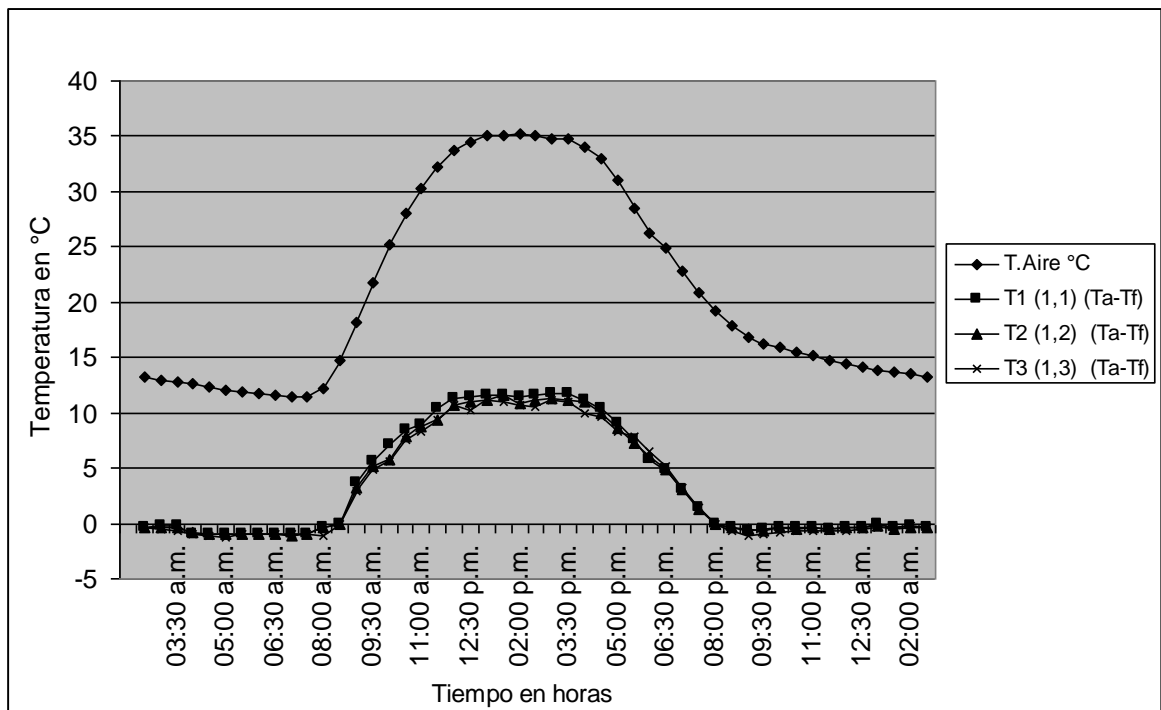


Fig. 4 Diferencias de temperatura del follaje, respecto al aire para tres repeticiones del tratamiento con 75 % de humedad residual y diferentes granulometrías del sustrato de mayo a septiembre de 2007.

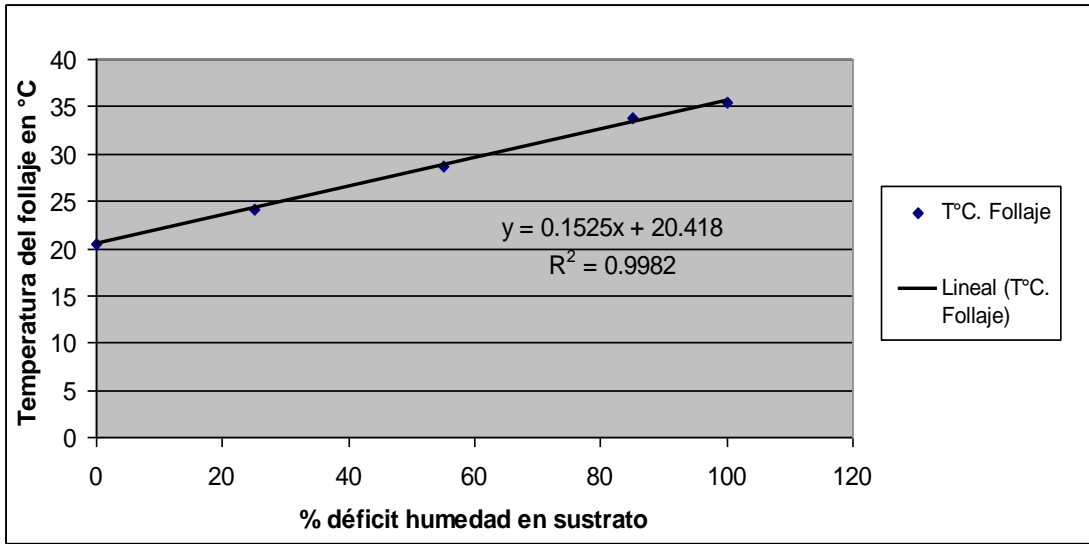


Fig. 5 Relación entre el % de déficit de humedad del sustrato y la temperatura del follaje en tezontle granulometría fina menor, igual a 2 mm.

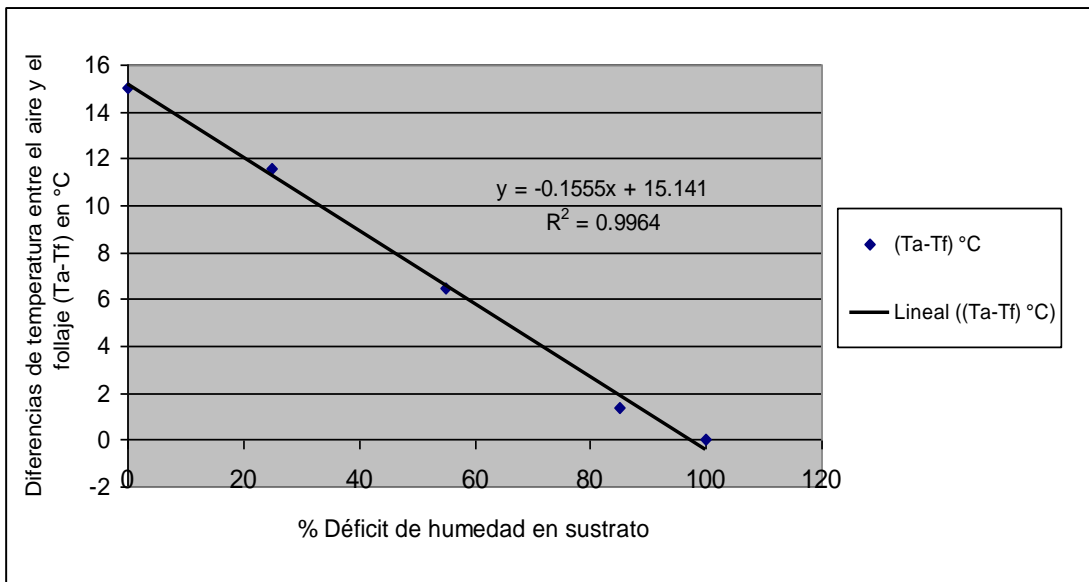


Fig. 6 Relación entre el % de déficit de humedad del sustrato y las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf) en tezontle granulometría fina menor, igual a 2 mm.

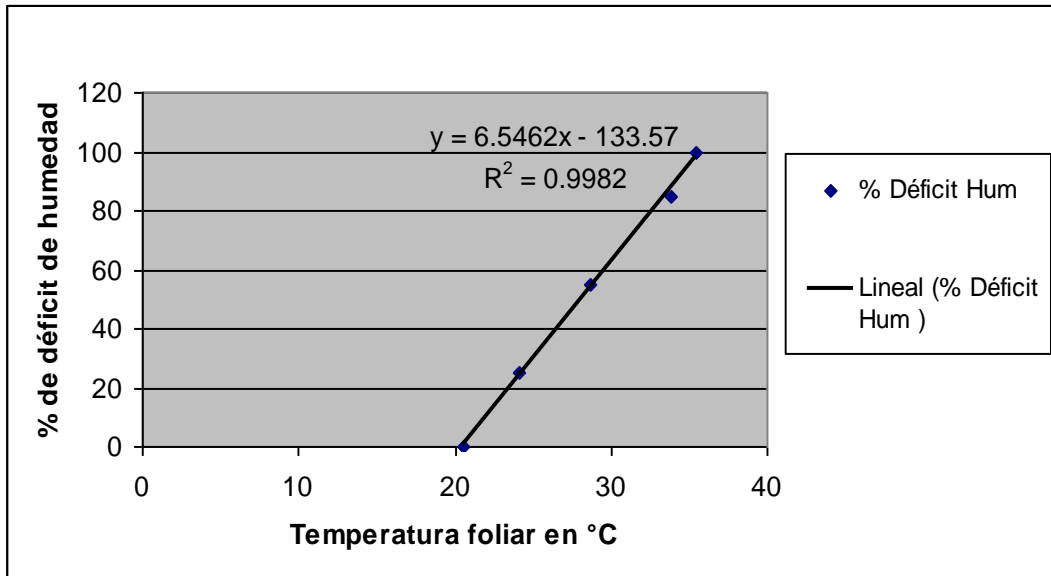


Fig. 7 Estimación del % de déficit de humedad en función de la temperatura foliar en tezontle granulometría fina menor, igual a 2 mm.

Nota: La tabla 6-9 de la sección de resultados tiene 21 datos, porque a diferencia de los cinco datos mostrados en la figura 7, el resto de los datos de la tabla 6-9 mencionada, fueron estimados con el modelo de la figura 7.

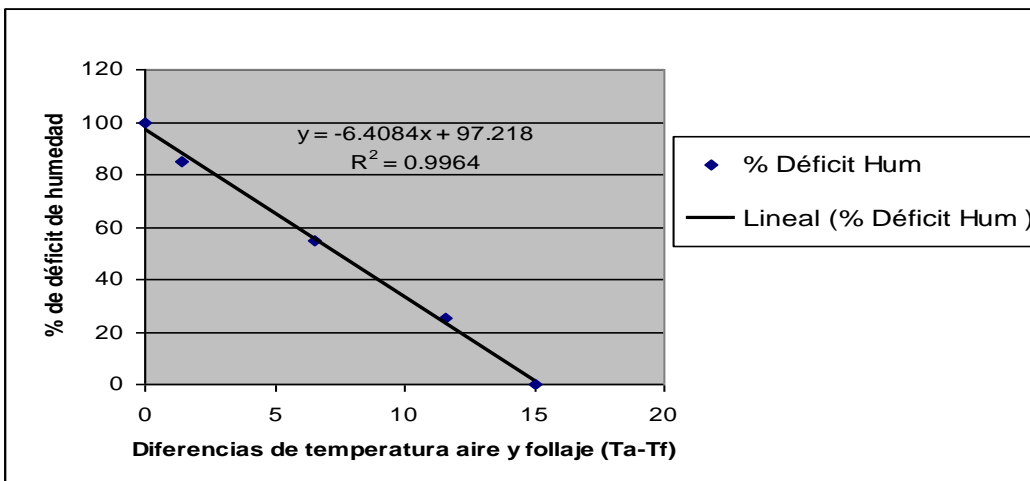


Fig. 8 Estimación del % de déficit de humedad del sustrato, en función de las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf), en tezontle granulometría fina, menor, igual a 2 mm.

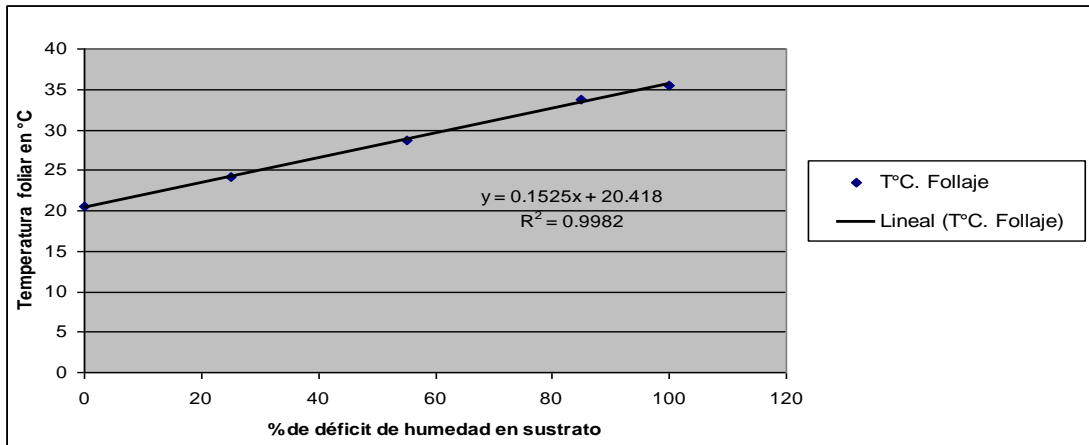


Fig. 9 Estimación de la temperatura foliar en función del % de déficit de humedad del sustrato, en tezontle granulometría fina, menor, igual a 2 mm.

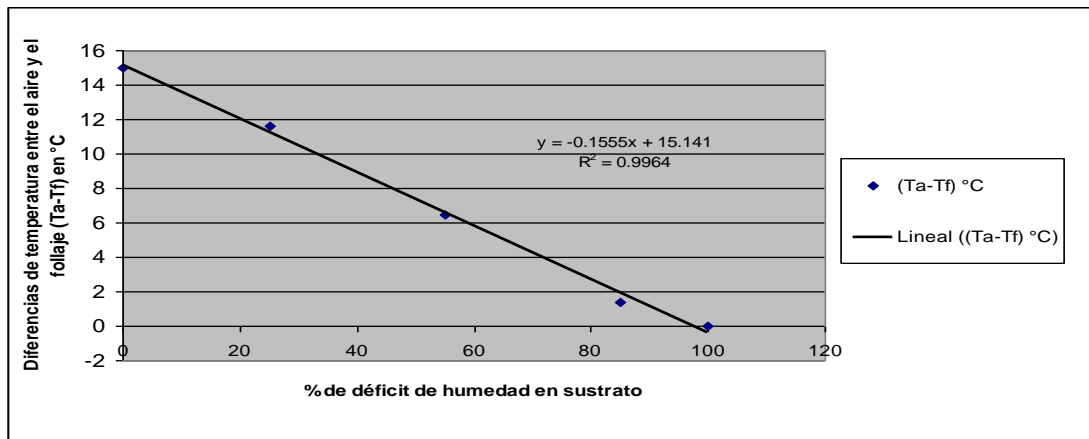


Fig. 10 Estimación de las diferencias de temperatura entre el aire y el follaje (Ta-Tf), en función del % de déficit de humedad del sustrato, en tezontle granulometría fina, menor, igual a 2 mm.

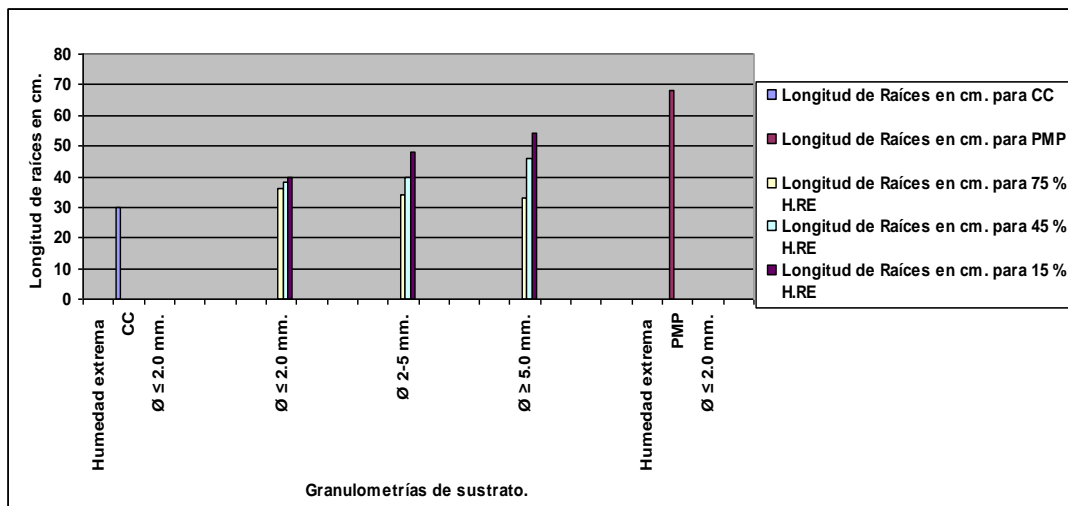


Fig. 11 Comparación de longitud de raíces entre tratamientos de humedad y granulometrías de sustrato respecto a tratamientos de humedad extrema a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).