



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA

**SIMULACIÓN Y CALIBRACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS
PARA LA TRANSPIRACIÓN DE JITOMATE (*Solanum
lycopersicum* L.) BAJO INVERNADERO EN EL CENTRO DE
MÉXICO.**

TESIS
QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA, ORIENTACIÓN BIOSISTEMAS

PRESENTA:

ANTONIO MARTÍNEZ RUIZ

Chapingo, Estado de México, Octubre de 2012



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

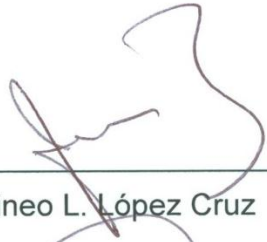
**SIMULACIÓN Y CALIBRACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA
TRANSPIRACIÓN DE JITOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) BAJO
INVERNADERO EN EL CENTRO DE MÉXICO**

Tesis realizada por **Antonio Martínez Ruiz** bajo la dirección del comité asesor
indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener
el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

ORIENTACIÓN: BIOSISTEMAS

DIRECTOR:



Dr. Irineo L. López Cruz

ASESOR:



Dr. J. Armando Ramírez Arias

ASESOR:



M.C Agustín Ruíz García

"All truths are easy to understand once they are discovered; the point is to discover them."
Galileo Galilei

AGRADECIMIENTOS

Por este medio deseo agradecer a las personas e instituciones que hicieron posible mi formación y la realización del presente trabajo, entre ellos;

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) por el apoyo brindado para la realización de mi estudio de maestría.

Al programa de Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma Chapingo, por ser parte de su proyecto educativo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo de beca para la realización de la maestría.

Al Dr. Irineo López Cruz, por su acertada dirección, consejo y sugerencias hizo posible la culminación de éste trabajo.

Al Dr. J. Armando Ramírez Arias por las sugerencias y apoyo para realizar éste trabajo.

Al M.I. y amigo Agustín Ruiz García por todo el apoyo brindado, ya que sin su ayuda no hubiera sido posible terminar en tiempo y forma la presente tesis de investigación.

Al Dr. Eugenio Romantchik, a la secretaria Rosy, Dr. Mauricio Carrillo por todo su apoyo brindado.

A todas aquellas personas que de manera desinteresada me brindaron su apoyo en la realización de presente trabajo.

DEDICATORIA

A Dios (por haberme dado la oportunidad de existir)

A mi madre querida

Carmen Ruiz Bautista

A la memoria de mi padre (q.e.p.d):

Santiago Martínez Mendoza

A mis hermanos y hermana (“kokitoño”, “koki”, “Heraldo”, “Martin”,
“Argeo” y “Rosa”)

A mis queridos amigos (Agustín, Vicente Mora, Vicente García,
Hector, Pedro, Dulce, Pepe, René, Yaneli)

Especialmente a mi gran amigo Elfego Valencia Sangines y su
esposa Rosy.

A mi primo Arturo Jiménez y esposa Rosalba Julián B. y a la
memoria de mi querido profesor (q.e.p.d) Jacob Peláez C y familia.

"I have never met a man so ignorant that I couldn't learn something from him."

Galileo Galilei

DATOS BIOGRAFÍCOS DEL AUTOR

Antonio Martínez Ruiz nace en el municipio Santo Domingo de Morelos en el Estado de Oaxaca un 28 de Diciembre de 1983, realizó sus estudios de primaria en la escuela Aquiles Serdán de la misma comunidad, después realizó estudios de secundaria en la escuela Rosario Castellanos en el mismo municipio y en año 2000, aprueba el examen de ingreso a la Universidad autónoma Chapingo donde exitosamente culmina sus estudios de nivel medio superior para después ingresar a estudiar la carrera de ingeniero en irrigación en la misma universidad, egresando en el año 2008. En el año 2010 después de haberse empleado como diseñador de sistemas de riegos e invernaderos y elaboración de sistemas de información geográfica decide ingresar al posgrado en ingeniería agrícola uso y manejo integral del agua, en el área de biosistemas trabajando en el área de manejo de cultivos de invernaderos, nutrición vegetal, fisiología vegetal y manejo de programación de riegos.

SIMULACIÓN Y CALIBRACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA TRANSPIRACIÓN DE JITOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) BAJO INVERNADERO EN EL CENTRO DE MÉXICO

Autor: Antonio Martínez Ruiz
Director: Dr. Irineo L. López Cruz

El objetivo del presente trabajo fue calibrar y validar modelos matemáticos para predecir la tasa de transpiración de un cultivo de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) en sustrato, bajo invernadero para uso en la programación de riego. Actualmente en México existe poco conocimiento de la transpiración de cultivos en invernadero y el uso eficiente del agua. Sin embargo, la planeación de los calendarios de riego requiere una buena comprensión del uso del agua por los cultivos en relación a su ambiente. El experimento se llevo a cabo en un invernadero tipo sierra con ventilación natural localizado en la Universidad Autónoma Chapingo, México. El sustrato usado fue una mezcla de tezontle y fibra de coco. Las variables ambientales, medidas cada minuto, dentro del invernadero, fueron: la temperatura, humedad relativa, velocidad de viento y radiación solar global. Se usó un datalogger Campbell Scientific para almacenar los datos. La transpiración se midió con un lisímetro de pesada. El experimento duró 49 días lo que permitió medir las tasas de transpiración con diferentes valores de índice de área foliar. Se analizó el comportamiento de cuatro modelos teóricos de transpiración. Los parámetros de todos los modelos fueron estimados mediante el enfoque de mínimos cuadrados. Los resultados mostraron mejores predicciones del modelo de Stanghellini y del modelo de Baille de acuerdo a las estadísticas MSE, RMSE, R^2 y el índice de ajuste. Sin embargo el ANOVA no detectó diferencias estadísticas significativas entre las calidad de predicción de los cuatros modelos.

Palabras clave: riego, estimación de parámetros, modelos matemáticos.

SIMULATION AND CALIBRATION OF MATHEMATICAL MODELS FOR TOMATOES (*Solanum lycopersicum* L.) TRANSPIRATION UNDER GREENHOUSE CONDITIONS IN THE CENTRAL REGION OF MEXICO

Author: Antonio Martínez Ruiz
Advisor: Dr. Irineo L. López Cruz

The aim of the current research was to calibrate and validate mathematical models to predict the transpiration rate of a tomato (*solanum lycopersicum* L.) crop under substrates in greenhouse for irrigation scheduling use. Nowadays, in Mexico there is a lack of knowledge about transpiration of greenhouse crops and the use of water efficiently. However, the planning of the irrigation scheduling requires a good comprehension of the use of water by the crop related with its environment conditions. The experiment was carried out in a saw type greenhouse with natural ventilation located at the University of Chapingo, Mexico. The substrate used was a mix of volcanic sand (Tezontle) with coconut fiber. The environment variables measured each minute inside the greenhouse were: temperature, relative humidity, wind velocity and global solar radiation. A Campbell Scientific datalogger was used to record the data. The transpiration was measured using a weighted lysimeter. The experiment lasted 49 days which allowed measurements of crop transpiration rates for different leaf area indices values. The behavior of four theoretical transpiration models was analyzed. Model parameters were estimated by the least squares approach. Results showed better predictions for Stanghellni and Baille models according to the statistics MSE, RMSE, R^2 and fitting index. Nevertheless, the ANOVA did not detected significant statistical differences among the prediction quality of the four models.

Key words: Irrigation, parameter estimation, mathematical models.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Producción en invernaderos	4
2.2 Necesidades de agua de los cultivos bajo invernaderos	7
2.3 Métodos de programación de riegos	9
2.3.1 Con base a la humedad del suelo o sustrato	10
2.3.2 El estado hídrico de la planta	12
2.3.3 Tasa de transpiración de la planta	14
2.3.4 Parámetros climáticos	15
2.4 Transpiración	16
2.5 Importancia de la transpiración.....	20
2.5.1 Riego	20
2.5.2 Control ambiental	22
2.6 Métodos para la estimación de la transpiración.....	23
2.6.1 Directos	23
2.6.2 Indirectos.....	23
2.7 Modelación matemática.....	24
2.7.1 Modelos mecanicistas y empíricos.	26
2.8 Modelos de transpiración.....	27

2.8.1 Evaporación desde una superficie húmeda.....	27
2.8.2 Modelo de Penman-Monteith	30
2.8.3 Modelo de Stanghellini	33
2.8.4 Modelo simplificado de transpiración en invernadero.....	35
2.9 Determinación de variables que intervienen en los modelos.....	36
2.9.1 Radiación neta	36
2.9.2 La radiación neta en un cultivo	37
2.9.3 Resistencia estomática (r_s).....	39
2.9.4 Resistencia aerodinámica (r_b).....	43
2.9.5 Presión de vapor del aire.....	45
2.9.6 Pendiente de la curva de presión a saturación (s)	47
2.9.7 Calor latente de vaporización (L).....	48
2.9.8 Índice de área foliar	49
2.10 Evaluación de modelos.....	50
2.10.1 Importancia de la evaluación de un modelo	50
2.10.2 Gráfica de predicción de modelos versus valores observados.....	51
2.10.3 Gráfica de residuos	51
2.10.4 Medidas de ajuste simple entre valores medidos y estimados.....	52
Capítulo 3. OBJETIVOS	55
3.1 Objetivo general.....	55
3.2 Objetivos particulares	55
Capítulo 4. MATERIALES Y METODOS	56
4.1 Cultivo.....	56
4.2 Estructura	58
4.3 Sustrato	59
4.4 Sistema de cultivo.....	60
4.5 Medición de variables	61
4.5.1 Sensores de temperatura y humedad del aire.....	61

4.5.2 Sensores de velocidad de viento.....	63
4.5.3 Sensores de radiación.....	64
4.5.4 Adquisición de datos	65
4.6 Determinación de la tasa de transpiración.....	66
4.7 Medición de Área foliar	69
4.8 Cálculo de la tasa de transpiración.....	71
4.9 Modelación de la tasa de transpiración	72
4.9.1 Modelo de Baille	73
4.9.2 Modelo de Penman-Monteith	73
4.9.3 Modelo de Stanghellini	74
4.10 Procedimiento de calibración.....	75
4.11 Medidas estadísticas para evaluar el desempeño de los modelos en calibración y validación.....	76
Capítulo 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	77
5.1 Calibración de los modelos para IAF= 2.3 – 3.02 [m ² m ⁻²].....	81
5.2 Resultados de la calibración para IAF= 2.3 – 3.02 [m ² m ⁻²].....	82
5.3 Validación de los modelos para IAF= 2.3 – 3.02 [m ² m ⁻²].....	85
5.4 Resultados de la validación para IAF= 2.3 – 3.02 [m ² m ⁻²].....	87
5.5 Calibración de los modelos para IAF= 3.0 – 3.02 [m ² m ⁻²].....	92
5.6 Resultados de la calibración para IAF= 3.0 – 3.02 [m ² m ⁻²].....	93
5.7 Validación de los modelos para IAF= 3.0 – 3.02 [m ² m ⁻²].....	95
5.8 Resultados de la validación para IAF= 3.0 – 3.02 [m ² m ⁻²].....	98
5.9 Calibración de los modelos para IAF= 1.84 – 2.32 [m ² m ⁻²].....	102
5.10 Resultados de la calibración para IAF= 1.84 – 2.32 [m ² m ⁻²].....	103
5.11 Validación de los modelos para IAF= 1.84 – 2.32 [m ² m ⁻²].....	105
5.12 Resultados de la validación para IAF= 1.84 – 2.32 [m ² m ⁻²].....	107
5.13 Aplicación de riego	111
5.15 Discusión	112

5.15.1 Calibración de los modelos de transpiración	112
5.15.2 Validación de los modelos de transpiración	116
Capítulo 6. CONCLUSIÓN.....	119
BIBLIOGRAFIA.....	121

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Superficie de invernaderos en el mundo (Giacomelli <i>et al.</i> ,2008). ..	5
Cuadro 2.2. Valores de resistencias estomáticas y aerodinámicas	44
Cuadro 5.1. Modelos utilizados para determinar el área foliar de la unidad experimental.	77
Cuadro 5.2. Valores de índices de área foliar para distintas fechas de muestreo, para un área de piso de la unidad experimental de 1.92 m ²	77
Cuadro 5.3. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo de Baille....	83
Cuadro 5.4. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo de Penman-Monteith (con resistencias de Wang y Boulard).....	83
Cuadro 5.5. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo de Penman-Monteith (con resistencias de Wang y Boulard) sin DPV.....	83
Cuadro 5.6. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo de Stanghellini versión simplificada.	83
Cuadro 5.7. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo de Stanghellini con resistencias de Villarreal.....	84
Cuadro 5.8. Parámetros estadísticos de la validación del modelo de Baille.	88
Cuadro 5.9. Parámetros estadísticos de la validación del modelo de Penman-Monteith (con resistencias de Wang y Boulard).....	88

Cuadro 5.10. Parámetros estadísticos de la validación del modelo de Penman-Monteith (con resistencias de Wang y Boulard) sin DPV.....	88
Cuadro 5.11. Parámetros estadísticos de la validación del modelo de Stanghellini versión simplificada.	89
Cuadro 5.12. Parámetros estadísticos de la validación del modelo de Stanghellini con resistencias de Villarreal.....	89
Cuadro 5.13. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo de Baille..	93
Cuadro 5.14. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo de Penman-Monteith (con resistencias de Wang y Boulard) sin DPV.....	94
Cuadro 5.15. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo de Stanghellini versión simplificada.	94
Cuadro 5.16. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo de Stanghellini con resistencias de Villarreal.....	94
Cuadro 5.17. Parámetros estadísticos de la validación del modelo de Baille. ..	99
Cuadro 5.18. Parámetros estadísticos de la validación del modelo de Penman-Monteith (con resistencias de Wang y Boulard) sin DPV.....	99
Cuadro 5.19. Parámetros estadísticos de la validación del modelo de Stanghellini versión simplificada.	99
Cuadro 5.20. Parámetros estadísticos de la validación del modelo de Stanghellini con resistencias de Villarreal.....	99
Cuadro 5.21. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo de Baille.	104

Cuadro 5.22. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo de Stanghellini versión simplificada.	104
Cuadro 5.23. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo de Stanghellini con resistencias de Villarreal.	104
Cuadro 5.24. Parámetros estadísticos de la validación del modelo de Baille.	108
Cuadro 5.25. Parámetros estadísticos de la validación del modelo de Stanghellini versión simplificada.	108
Cuadro 5.26. Parámetros estadísticos de la validación del modelo de Stanghellini con resistencias de Villarreal.	108
Cuadro 5.27. Coeficiente de variación de la Calibración de cada modelo para índices de área foliar 2.3 – 3.02 [$\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$].	109
Cuadro 5.28. Coeficiente de variación de la Calibración de cada modelo para índices de área foliar 3.00 – 3.02 [$\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$].	110
Cuadro 5.29. Coeficiente de variación de la Calibración de cada modelo para índices de área foliar 1.84 – 2.32 [$\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$].	111
Cuadro 5.30. Muestra el consumo de agua por el cultivo por cada unidad de radiación	112
Cuadro 5.31. Muestra el consumo de agua por el cultivo considerando diferentes valores de déficit de presión (kPa) de vapor y radiación (MJ).	112
Cuadro 5.32. Muestra el consumo de agua por el cultivo considerando diferentes valores de déficit de presión de vapor (kPa) y radiación (J/cm^2). ..	112

ANEXO1. Muestra la dimensión característica de la hoja de jitomate para los distintos bloques de datos.	127
ANEXO 2. Análisis de varianza de las predicciones de la transpiración con los 4 modelos para para índices de área foliar 2.3 – 3.02 [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$].	127
ANEXO 3. Análisis de varianza de las predicciones de la transpiración con los 4 modelos para índices de área foliar 3.00 – 3.02 [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$].	128
ANEXO 4. Análisis de varianza de las predicciones de la transpiración con los 4 modelos para índices de área foliar 1.84 – 2.32 [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$].	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1. Tensiómetro instalado y sensor de humedad watermark.....	11
Fig.2.2. TDR instalado y enviroScan instalado	12
Fig.2.3. Sbid (Self Balanced Impedance, Bridge)	12
Fig.2.4. Sensor de diámetro de fruto y sensor de diámetro de tallo.....	13
Fig.2.5. Sensor de flujo de savia.....	14
Fig. 2.6. Modelo para una planta estándar en un medio turbio (Ross, 1975). .	37
Fig. 4.1. Cultivo de jitomate en invernadero.....	58
Fig. 4.2. Invernadero tipo sierra con ventilación cenital donde se realizó el experimento.	59
Fig. 4.3. Cultivo de jitomate en sustrato	60
Fig. 4.4. Sensor de temperatura y humedad relativa HMP50 y detalle de la instalación.....	62
Fig.4.5. Sensor de velocidad del viento	64
Fig. 4.6. Piranómetro modelo CMP3-L.....	65
Fig. 4.7. Sistema de adquisición de datos y medición de variables climáticas	66
Fig. 4.8. Pasos para la instalación de la balanza electrónica para medir la transpiración del cultivo.	68
Fig.4.9. Estructura para la medición de la transpiración	69
Fig. 4.10. Determinación de área foliar (LI-COR modelo LI-3100) y medición de las dimensiones de las hojas.	71
Fig. 5.1. Variables meteorológicas de 25 días medidas dentro del invernadero, en Chapingo, México. a) velocidad del viento, b) radiación solar global, c) temperatura, d) humedad relativa.	78
Fig.5.2. Transpiración de un cultivo de jitomate en invernadero durante 25 días medida en Chapingo, México.	79

Fig. 5.3. Transpiración del cultivo estimado con los diferentes modelos sin calibrar para 9 días.	80
Fig. 5.4. Transpiración del cultivo estimado con los diferentes modelos sin calibrar para 9 días.	80
Fig. 5.5. Calibración de los modelos de transpiración de a) Baille y b) Penman-Monteith (resistencias de Wang y Boulard) de 9 días para IAF de 2.3 – 3.02 [m ² m ⁻²].	81
Fig. 5.6. Calibración del modelo de transpiración de c) Stanghellini-simplificado, d) Stanghellini usando las resistencias de Villarreal de 9 días para IAF de 2.3 – 3.02 [m ² m ⁻²].	82
Fig. 5.7. Gráfica de regresión entre la transpiración medida y estimada por los diferentes modelos de transpiración y gráfica 1:1 para 9 días de calibración. ..	84
Fig. 5.8. Validación de los modelos de transpiración de a) Baille y b) Penman-Monteith (resistencias de Wang y Boulard) de 16 días para IAF de 2.3 – 3.02 [m ² m ⁻²].	85
Fig. 5.9. Validación del modelo de transpiración de c) Stanghellini-simplificado y d) Stanghellini usando las resistencias de Villarreal de 16 días para IAF de 2.3 – 3.02 [m ² m ⁻²].	86
Fig. 5.10. Validación de los modelos de transpiración de a) Baille y b) Penman-Monteith (resistencias de Wang y Boulard) de los días 12 y 13 de agosto de 2011 para IAF de 2.3 – 3.02 [m ² m ⁻²].	86
Fig. 5.11. Validación del modelo de transpiración de c) Stanghellini-simplificado d) Stanghellini con las resistencias de Villarreal para los días 12 y 13 de agosto de 2011 IAF de 2.3 – 3.02 [m ² m ⁻²].	87
Fig. 5.12. Gráfica de regresión entre la transpiración medida y estimada por los diferentes modelos de transpiración y gráfica 1:1 para 16 días de validación. .	90

Fig. 5.13. Variables meteorológicas de 10 días medidas dentro del invernadero, en Chapingo, México. a) velocidad del viento, b) radiación solar global, c) temperatura, d) humedad relativa.	91
Fig. 5.14. Transpiración de un cultivo de jitomate en invernadero durante 10 días medida en Chapingo, México.	92
Fig. 5.15. Calibración de los modelos de transpiración de a) Baille y b) Penman-Monteith (resistencias de Wang y Boulard) de 4 días para IAF de 3.00 – 3.02 [m ² m ⁻²].	92
Fig. 5.16. Calibración del modelo de transpiración de c) Stanghellini-simplificado, d) Stanghellini usando las resistencias de Villarreal de 4 días para IAF de 3.00 – 3.02 [m ² m ⁻²].	93
Fig. 5.17. Gráfica de regresión entre la transpiración medida y estimada por los diferentes modelos de transpiración y gráfica 1:1 para 4 días de calibración ...	95
Fig. 5.18. Validación de los modelos de transpiración de a) Baille y b) Penman-Monteith (resistencias de Wang y Boulard) de 6 días para IAF de 3.00 – 3.02 [m ² m ⁻²].	96
Fig. 5.19. Validación del modelo de transpiración de c) Stanghellini-simplificado, d) Stanghellini usando las resistencias de Villarreal de 6 días para IAF de 3.00 – 3.02 [m ² m ⁻²].	97
Fig. 5.20. Validación de los modelos de transpiración de a) Baille y b) Penman-Monteith (resistencias de Wang y Boulard) de los días 25 y 26 de Julio de 2011 para IAF de 3.00 – 3.02 [m ² m ⁻²].	97
Fig. 5.21. Validación del modelo de transpiración de c) Stanghellini-simplificado, d) Stanghellini usando las resistencias de Villarreal de los días 25 y 26 de Julio de 2011 para IAF de 3.00 – 3.02 [m ² m ⁻²].	98
Fig. 5.22. Gráfica de regresión entre la transpiración medida y estimada por los diferentes modelos de transpiración y gráfica 1:1 para 6 días de validación. .	100

Fig. 5.23. Variables meteorológicas de 14 días medidas dentro del invernadero, en Chapingo, México. a) velocidad del viento, b) radiación solar global, c) temperatura, d) humedad relativa.	101
Fig. 5.24. Transpiración de un cultivo de jitomate en invernadero durante 14 días medida en Chapingo, México.	102
Fig. 5.25. Calibración de los modelos de transpiración de a) Baille y b) Stanghellini-simplificado y c) Stanghellini con resistencia de Villarreal de 6 días para IAF de 1.84 – 2.32 [m ² m ⁻²].	103
Fig. 5.26. Gráfica de regresión entre la transpiración medida y estimada por los diferentes modelos de transpiración y gráfica 1:1 para 6 días de calibración.	105
Fig. 5.27. Validación de los modelos de transpiración de a) Baille y b) Stanghellini-simplificado y c) Stanghellini con resistencia de Villarreal de 8 días para IAF de 1.84 – 2.32 [m ² m ⁻²].	106
Fig. 5.28. Validación de los modelos de transpiración de a) Baille y b) Stanghellini-simplificado y c) Stanghellini usando la resistencias de Villarreal de los días 27 y 28 de Agosto de 2011 para IAF de 1.84 – 2.32 [m ² m ⁻²].	107
Fig. 5.29. Gráfica de regresión entre la transpiración medida y estimada por los diferentes modelos de transpiración y gráfica 1:1 para 8 días de validación. .	109

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

A pesar de que la industria de los invernaderos se distribuye principalmente en las regiones semiáridas de México, zonas donde el uso del agua es crítico, actualmente se conoce poco sobre la transpiración de cultivos en invernadero. Sin embargo, tanto el desarrollo de experimentos como la modelación de la tasa de transpiración en invernadero son necesarias, no únicamente para optimizar el riego, evitando condiciones extremas, sino también es útil para determinar su efecto en el control climático del invernadero tales como calefacción, refrigeración y ventilación (Bontsema *et al.*, 2007).

El proceso dominante relacionado con el agua es la gran cantidad que se absorbe desde el suelo, su translocación a través de la planta y su eventual pérdida hacia a la atmósfera como vapor de agua. De toda el agua absorbida por la planta menos del 5 % es retenido para el uso en el crecimiento y procesos bioquímicos. La mayor parte del agua, más del 95% se pierde por un proceso denominado transpiración.

La transpiración se define como la pérdida de agua en las plantas en forma de vapor a través de pequeños poros en las hojas llamados estomas y en menor medida en las lenticelas (Hopkins, 1995).

La transpiración está relacionada con el crecimiento. En efecto, muchas plantas cultivadas en condiciones de alta humedad (100% de humedad relativa) reduce sus tasas de crecimiento, probablemente por sobrepasar la turgencia óptima vacuolar necesaria para la extensión celular y por alteraciones de los

patrones de transporte y de redistribución de las sales por la planta, aunque la anulación de la transpiración no impide la circulación de las sustancias por los vasos. La transpiración controlada determinará efectos positivos en ambos fenómenos. De modo inverso, si la tasa transpiratoria es excesiva, las plantas desarrollan un déficit hídrico importante que puede causarle la muerte. En condiciones de estrés se inhibe la síntesis proteica y se incrementa la hidrólisis de proteínas que se transforman en arginina y particularmente en prolina (Gil, 1995).

El agua es uno de los ingredientes más importantes de la vida después del aire. Las plantas requieren el agua para su utilización en varios procesos metabólicos que permiten mantener vivas a las células.

En muchas partes del mundo el agua es la limitante más grande en la producción agrícola. A menudo esto se debe a la baja precipitación, aun que en ocasiones regiones con mismos niveles de precipitación tienen marcada diferencia de escases de agua como resultado de la alta evaporación y transpiración por efecto de las condiciones ambientales.

El uso eficiente del agua y la planeación de los calendarios de riego requiere una buena comprensión del uso de este recurso por los cultivos en relación a su ambiente. Estos tienen que ver con fenómenos físicos tales como la transferencia de calor y masa del cultivo al ambiente y como, éste proceso es influenciado por la radiación, temperatura, densidad de vapor (o presión) en la atmósfera, velocidad del viento y altura del cultivo.

Colinas (1998) indica que la transpiración es esencial para las plantas porque interviene en tres funciones principales. Ayuda a mantener una turgencia óptima, reduce la temperatura de las hojas, y promueve absorción y transporte de solutos.

La transpiración es uno de los componentes importantes en el balance de agua y energía en los cultivos, por tanto es el principal sistema de refrigeración de cultivos en invernadero. Su estimación es esencial para el control del clima y riego, por tal razón se ha prestado atención en investigaciones sobre control climático en invernadero. Este fenómeno explica porque al mantener altos niveles de transpiración es una de las formas más eficientes y baratas para refrescar el ambiente en invernaderos durante días calurosos con alta radiación, (Katsoulas *et al.*, 2002).

El fenómeno de descenso de temperatura a través de la transpiración es, no obstante, cierto. En efecto, las moléculas de agua que poseen mayor energía son las que se evaporan más fácilmente, quedando enriquecida la planta, por lo tanto, en moléculas de menor energía y, por consiguiente, de menor temperatura. Cuando un gramo de agua se evapora absorbe alrededor de 586 cal del medio ambiente (a 30 °C, 580 cal). En general las hojas absorben más energía radiante de las que utilizan y pierden por conducción y convección, por lo que la transpiración puede ser fundamental en su refrigeración (Gil, 1995).

Capítulo 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Producción en invernaderos

La producción en invernaderos es una industria en crecimiento, especialmente en climas templados, y es muy importante para la población como una fuente de ingresos y alimentos frescos y de alta calidad. Los invernaderos crean condiciones climáticas óptimas para el crecimiento de los cultivos y los protege de las enfermedades del exterior. Al mismo tiempo la producción en invernadero incrementa la eficiencia del uso del agua y posibilita tener una producción integrada y protegida (Von Zabeltitz, 2011).

Van Straten *et al.* (2011) menciona que el rápido crecimiento de la industria de los invernaderos se debe a dos razones. La primera es que el invernadero separa al cultivo del medio ambiente, proporcionando así una manera de protegerse de las condiciones climáticas externas. Esto permite la producción de cultivos que de otra manera no sería posible. La segunda razón es que posible controlar las variables climáticas del medio de cultivo.

El cultivo experimenta las variables ambientales locales tales como, la temperatura, contenido de humedad, y concentración de CO₂. La fotosíntesis, evapotranspiración, el crecimiento y desarrollo dependen de estas variables, por otra parte los cultivos influyen sobre estas variables a través de la fotosíntesis, respiración y evapotranspiración. El clima del invernadero también depende de las condiciones climáticas externas. Además de la radiación solar, perturbación externa más importante es la temperatura del aire exterior,

contenido de humedad y velocidad del viento. La velocidad del viento influye en el intercambio de calor de la pared y la cubierta y también afecta a la tasa de ventilación. (Van Straten *et al.*, 2011).

La producción en invernadero es exitosa si los productores producen alta calidad y altos rendimientos. Estas dos condiciones dependen de un manejo eficiente de la producción, conocimiento y entrenamiento del productor, estructura apropiada del invernadero, apropiada instalación, mantenimiento del sistema y de un control eficiente del clima en invierno y verano (Heuvelink, 2005).

El área de invernadero en el mundo se incrementa cada año. La mayoría de los invernaderos se construyen en áreas de clima templado y más del 90 % de los invernaderos son de plástico, el área estimada de invernaderos en el mundo se muestran en el cuadro 2.1 (Giacomelli *et al.*, 2008 citado por Von Zabeltitz, 2011).

Cuadro 2.1. Superficie de invernaderos en el mundo (Giacomelli *et al.*, 2008).

Región	Invernaderos y túneles grandes de plásticos (ha)	Invernadero de cristal (ha)
Europa occidental	140,000	29,000
Europa oriental	25,000	1,800
África	27,000	600
Este medio	28,000	13,000
Norte América	9,800	1,350
Centro y Sur América	12,500	0
Asia y Oceanía	450,000	2,500

Comparando diferentes áreas, sistemas de cultivo, condiciones climáticas, equipo y construcción de invernaderos, así como la experiencia técnica, estos

difieren considerablemente. Esto da como resultado diferencias en rendimientos entre regiones cuando se expresa la producción por planta o por unidad de área. Mientras podría esperarse que en regiones de más radiación tengan los más altos rendimientos, el nivel de tecnología de invernaderos puede ser el factor más importante. Por ejemplo el rendimiento promedio en regiones de alta radiación (Almería, España) es menor que (28 kg m^{-2}) en Holanda o Canadá (60 kg m^{-2}) (Heuvelink, 2005).

Hay varias definiciones de invernaderos, pero desde el punto de vista de proyecto y construcción, de acuerdo a la unión europea: UNE-EN-13031-1, el invernadero es una estructura usada para el cultivo y/o protección de las plantas y cosechas, el cual optimiza la transmisión de radiación solar bajo condiciones controladas, para mejorar el entorno del cultivo y cuyas dimensiones posibilita el trabajo de las personas en su interior (Castellanos, 2009).

Actualmente existe una gran diversidad de estructuras de invernaderos en el mercado. El diseño debe responder a varias interrogantes tales como: el clima, el tipo de cubierta, altura y volumen de la instalación, área de ventilación y tipo de cultivo. El equipamiento contempla también: cisterna, cabezal de riego, calefacción y enfriamiento. Los invernaderos bien diseñados ofrecen control sobre: heladas y bajas temperaturas, insolación y altas temperaturas, velocidad del viento, exceso de humedad del suelo, enfermedades, insectos vectores de enfermedades, daños mecánicos por viento y granizos, déficit y excesos de

humedad relativa, manejo de la concentración del CO₂, cantidad y calidad de luz, (Castellanos, 2009).

2.2 Necesidades de agua de los cultivos bajo invernaderos

El cultivo utiliza la radiación solar, el CO₂ de la atmósfera, agua y nutrientes para producir biomasa (frutos, hojas, tallos y raíces) mediante el proceso de la fotosíntesis. Cuando los estomas de las hojas están abiertos, para permitir la entrada de CO₂, se produce la emisión de agua en forma de vapor desde la planta a la atmósfera mediante el proceso de transpiración. Esta pérdida de agua es un costo que debe pagar el cultivo para producir y debe ser repuesta por la planta mediante la extracción de agua del suelo por la raíces.

Esta cantidad de agua unida a la que se pierde por evaporación desde la superficie del suelo, constituye lo que se conoce como evapotranspiración del cultivo (ETc) y debe ser satisfecho por el riego. Con el riego se debe aplicar la cantidad justa para cubrir el consumo de agua del cultivo o ETc. Un exceso de agua de riego supone el lavado de fertilizantes lo que puede acarrear problemas medioambientales por la contaminación de las aguas subterráneas, (Valera *et al.*, 2002).

El uso de la tecnología, dentro de la agricultura, ha tomado auge, debido principalmente a la gran necesidad de agua y a su baja disponibilidad de ella. El mayor uso del recurso agua es en el sector agrícola, en tiempos recientes, se tienen problemas de rentabilidad, requiriéndose una atención prioritaria en la programación de riego (García y Vázquez, 2004).

Uno de los retos para la investigación agrícola es obtener el máximo rendimiento junto con un óptimo crecimiento posible de un cultivo utilizando la menor cantidad de agua. Especialmente en condiciones donde la única forma de aportación es la proporcionada por el riego. Esta actividad requiere mayor relevancia debido a que el uso de sustratos es muy común en los invernaderos y la cantidad de agua que éstos pueden almacenar es muy reducida. En tales condiciones se hace necesario suministrar láminas de riego muy pequeñas y muy frecuentes, aplicadas con precisión.

Para lograr este objetivo se debe intervenir en el control, manejo y uso racional del recurso, tomando en consideración que una de las mejores tecnologías es el uso de sistemas de riego por goteo, por otro lado, dentro de las opciones que se tienen para lograr un mayor aprovechamiento de la humedad está el conocimiento continuo de la demanda evapotranspirativa de los cultivos (García y Vázquez, 2004).

La planta debe ser considerada como un sistema en el cual existe una serie de factores que se interrelacionan e interactúan y que a su vez se encuentran dentro de otro sistema que constituye su entorno ambiental, respondiendo a esos estímulos ambientales que pueden ocasionar estrés. Las condiciones de estrés más comunes son el clima, nutrición, las enfermedades, y la calidad y cantidad de agua (García y Vázquez, 2004).

2.3 Métodos de programación de riegos

El cultivo de jitomate es una de las cinco hortalizas más cultivadas en México por lo que es importante obtener modelos que permitan estimar la tasa de transpiración de éste, considerando las variables climáticas que más afectan este proceso. Estos mismos modelos pueden llegar a ser de gran utilidad en el control automático de la aplicación del agua de riego. Para cultivos en invernaderos, el enfoque más usado, hasta ahora, para predecir la evapotranspiración se basa en modelos de regresión lineal múltiple entre la evapotranspiración y la radiación global y el déficit de presión de vapor (Bass y Rijssel, 2006).

La programación del riego es un conjunto de procedimientos técnicos desarrollados para predecir cuánto y cuando regar. Los métodos de programación del riego se basan en:

- Medida del agua del suelo.
- Medida del estado hídrico de la planta.
- Tasa de transpiración de la planta.
- Medidas de parámetros climáticos.

El manejo del riego en sustrato, es uno de los factores más importantes para conseguir altos rendimientos y buena calidad de fruto. Esta actividad adquiere más relevancia debido a que el uso de sustrato es cada vez más común en los invernaderos. En tales condiciones se hace necesario suministrar láminas de riegos pequeñas y frecuentes, aplicada con la mayor precisión. Por

otro lado la dinámica de la transpiración en el invernadero está sujeta a cambios de corto plazo en el clima (Castellanos, 2009).

En la actualidad el control en el aporte de agua es realizado con base a diferentes criterios específicos asociados a: contenido de humedad del suelo o sustrato, la estimación de la evapotranspiración del cultivo, medidas de la planta, el sistema de riego, y la integración del sistema planta-sustrato-clima.

2.3.1 Con base a la humedad del suelo o sustrato

Está basado en la medida del contenido volumétrico de agua o del potencial matricial del suelo o sustrato. En cultivos intensivos desarrollados en sistemas sin suelo el ambiente de la raíz es un medio altamente salino y por tanto, su potencial osmótico contribuye considerablemente al potencial hídrico total del sustrato, por lo cual debe ser tomado en cuenta en la determinación de este indicador. Conociendo el contenido volumétrico de agua deseado que debe mantener el sustrato o el potencial hídrico correspondiente a la capacidad de reserva de agua del sustrato a la que se desea aportar la dosis de riego, se determina cuando iniciar el riego (Ramírez, 2005). En este criterio entran la medida del potencial matricial del suelo, sensores de nivel, control del volumen de la solución lixiviada, y el contenido relativo de agua (Medrano, 1999).

La incorporación en el sustrato de tensiómetros adaptados con transductores de presión permite un registro continuo de la evolución del potencial hídrico. Son útiles en medios homogéneos en los que la parte sensible del sensor haga buen contacto con las partículas del sustrato. Los valores son

relativamente estables y deben instalarse varias unidades, estableciéndose un criterio para su localización en función de las características del sistema. El rango de medida debe estar entre 0 a 10 kPa (Marfá, 1996; Medrano, 1999).

Un aspecto de importancia a considerar con este tipo de mediciones es la variación del contenido de humedad o del potencial hídrico en el sustrato, puesto que no hay uniformidad en su distribución.

Los sensores que miden el contenido del agua del suelo permiten conocer como el cultivo lo va extrayendo. De tal forma que el riego puede programarse para mantener un contenido de agua en el suelo entre dos niveles de humedad. El límite superior es fijado para evitar drenaje y por tanto lavados de fertilizantes, el límite inferior representa a partir el cual el cultivo sufre estrés hídrico (Fernández *et al.*, 2001).

Los sensores más utilizados para la medida del contenido del agua en el suelo son: Tensiómetros sondas, Watermark, TDR (Time Domain Reflectometry), EnviroScan, Sbid (Self Balanced Impedance Bridge) ver figura 2.1 - 2.3.



Fig.2.1. Tensiómetro instalado y sensor de humedad watermark

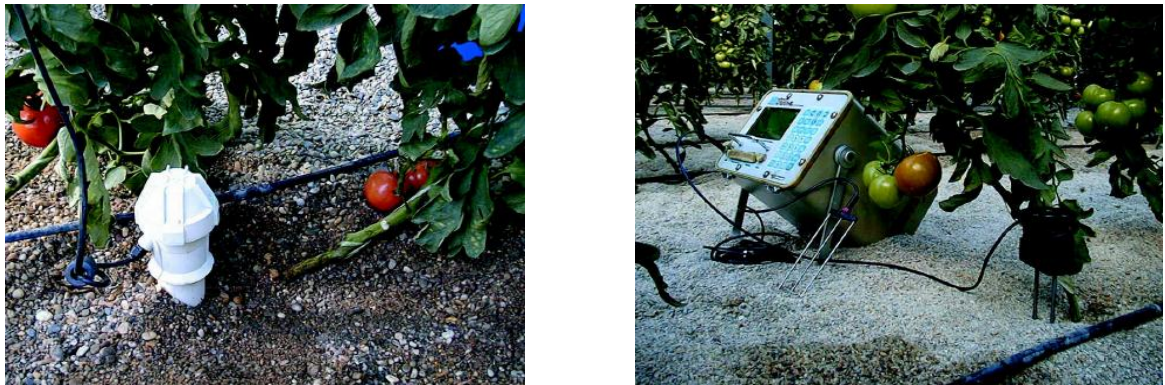


Fig.2.2. TDR instalado y enviroScan instalado



Fig.2.3. Sbidi (Self Balanced Impedance, Bridge)

2.3.2 El estado hídrico de la planta

En este criterio se encuentran: medida del potencial hídrico de la planta, termometría de infrarrojo y micro variaciones del diámetro del tallo. El primero se lleva a cabo mediante sensores micro psicrométricos, su aplicación para la gestión de riegos, exige conocer valores límites asociados a los potenciales hídricos para la especie en común. La segunda basa su determinación a una

diferencia de temperatura entre el aire y la hoja. La tercera basa su estimación en las variaciones del estado de dilatación y contracción del tallo provocados por el proceso de transpiración y absorción de agua (Medrano, 1999).

Estos métodos incluyen técnicas que miden directamente las pérdidas de agua de una parte de la planta, de la planta entera o de un grupo de plantas, o miden características relevantes de éstas que facilitan la estimación de la transpiración. Los avances en electrónica han hecho que el uso de sensores que monitorizan en continuo el estado hídrico de la planta, facilite la toma de decisión en la programación de riego (Fernández *et al.*, 2001).

El estado hídrico del cultivo puede utilizarse en la programación de riegos mediante la utilización de los sensores como son sensores de medida de los órganos de la planta y sensores de flujo de savia, ver figura 2.4 - 2.5.



Fig.2.4. Sensor de diámetro de fruto y sensor de diámetro de tallo



Fig.2.5. Sensor de flujo de savia.

2.3.3 Tasa de transpiración de la planta

En este criterio se encuentran los siguientes: balanza lisímetro, bandeja de demanda y bandeja de drenaje. El primero basa la medida de la transpiración de una o varias plantas situadas en una balanza que registra la pérdida de peso y activa un mecanismo de gestión de riego cuando alcanza cierto nivel o peso (Stanghellini y Van Meurs, 1992), se realiza un filtrado de los datos y se considera el drenaje en el sistema.

El uso de básculas que permiten pesar las bolsa o maceta se han vuelto de gran ayuda para los invernaderos de alta tecnología y tecnología intermedia, se usa mucho en lana de roca y fibra de coco, es un método simple que involucra el nivel de agua transformado en peso, el único inconveniente de este método es que tiene que estar conectado a una computadora con un programa de riego informático, lo cual significa un costo adicional; algunos sistemas de automatismos de riego como PRIVA ya vienen con este sistema de control de riego integrado (Castellanos, 2009).

Cuando se usan los sustratos como medio de cultivo, se deben instalar los dispositivos denominados bandeja de drenaje, que ayuda a definir la demanda de riego de los cultivos. Este es el dispositivo más elemental para definir dicha demanda, el cual se basa en medir el volumen de agua de entrada en la bandeja (mediante un recipiente que recibe varios goteros) y el volumen de salida en el drenaje por diferencia se calcula la cantidad de agua que consumió el cultivo. Este método se relaciona con todos los otros métodos para determinar cuando y cuanto regar tales como radiación y calendario (Castellanos, 2009).

La bandeja de demanda, es una estructura similar a la bandeja de drenaje, está provista en un extremo de un reservorio donde es depositada el agua drenada del sustrato. En el borde del reservorio está instalado un sensor compuesto de dos electrodos dispuestos a diferentes profundidades que funcionan como sensores de nivel.

2.3.4 Parámetros climáticos

Un método utilizado en la automatización de riego es la evaluación de la transpiración del cultivo mediante modelo que sea capaz de pronosticar a corto plazo las exigencias hídricas del sistema sustrato-planta. La mayor precisión se consigue con la utilización de fórmulas usadas en el balance de energía del cultivo. Estos modelos se integran dentro de la computadora de riego y se ha de fijar el nivel de agotamiento del agua disponible en el sustrato más un porcentaje de lixiviados que se compensará con la dosis de riego (Medrano, 1999).

Un método ampliamente utilizado en los sistemas de riego consiste en la aplicación de riego por métodos empíricos en la estimación de demanda de agua basados en la radiación solar. Se define un umbral de riego, con base a la radiación acumulada (Ramírez, 2005). Existen automatismos que ya disponen de la interfaz para conectar el sensor de radiación y que permite disparar el riego cuando se acumule determinada cantidad de energía expresada en J/cm^2 , esta estrategia se puede complementar simultáneamente con el conocimiento de los porcentajes de drenaje en los cuatro periodos del día. En el riego por radiación existen ciertas reglas flexibles en cuanto a la demanda hídrica que permite realizar ajustes. Para la región de Guanajuato, se ha experimentado que el volumen de riego debe ser de 2.2 a 3.6 veces la radiación, expresados estos datos en mm/m^2 por cada J/cm^2 de energía acumulada (Castellanos, 2009).

El proceso de transpiración es el fenómeno más importante que influye en la pérdida de agua en los cultivos ya que más de 95 % se pierde mediante este proceso y hacer una programación de riego más cercano a la condición real de un sistema de producción requiere conocer los factores que la afectan, la manera en que se miden, y otras perturbaciones que pueden existir en el interior del invernadero.

2.4 Transpiración

La principal pérdida de vapor de agua en las plantas ocurre a través de los poros de las hojas y es conducido por diferencias en la presión de vapor entre los espacios internos de la hoja y el aire del ambiente (Hopkins, 1995).

La transpiración se define como la pérdida de agua en las plantas en forma de vapor a través de pequeños poros en las hojas llamados estomas y en menor medida en las lenticelas (Hopkins, 1995).

La transpiración ocurre tanto en el día como en la noche, alrededor del 95% ocurre en el día y únicamente el 5% ocurre en la noche. Durante el día la transpiración máxima ocurre al medio día. El fenómeno de transpiración fue observado primeramente por Stephen Hales en 1727. Existen tres tipos de transpiración dependiendo del órgano que participa, estos son: transpiración estomática, transpiración cuticular y transpiración lenticular (Sinha, 2004).

La teoría de la transpiración de cultivos ha recibido considerable atención durante las décadas recientes. Penman (1948) y Monteith (1965) han dado contribuciones importantes al respecto teniendo como resultado de sus contribuciones la célebre ecuación de Penman-Monteith. Este enfoque, se basa en principios físicos y es visto como un estudio de fisiología vegetal y física ambiental (Thorney y Johnson, 1990).

La transpiración es uno de los componentes importantes en el balance de agua y energía en los cultivos, por tanto es el principal sistema de refrigeración de cultivos en invernaderos. Su estimación es esencial para el control del clima y riego, por tal razón se ha prestado atención en investigaciones sobre control climático en invernadero. Este fenómeno explica porque al mantener altos niveles de transpiración es una de las formas más

eficientes y baratas para refrescar el ambiente en invernaderos durante días calurosos con alta radiación (Katsoulas *et al.*, 2002).

Los minerales son transportados a los diversos órganos de la planta a través del flujo del agua (transpiración), así que una limitada absorción de agua causa deficiencias nutrimentales particularmente de calcio, la deficiencia de calcio en frutos causa el daño denominado “Blossom and Rot” y este ha sido observado tanto en condiciones de bajas y altas tasas de transpiración, en el segundo caso los minerales se transportan hacia las hojas ya que es el órgano de mayor demanda (Bontsema *et al.*, 2007).

El agua que se pierde por evaporación del suelo y transpiración del cultivo debe ser remplazado a través del riego en cantidades precisas para cubrir el consumo del cultivo. Es importante mencionar que la falta o exceso de agua trae consigo una disminución en la producción y otros problemas como asfixia radicular, inundación del sustrato, déficit hídrico etc. El sistema de control del riego basado en micro lisímetros es una excelente herramienta para optimizar la productividad a través de un riego adecuado y eficiente. Pero es una opción cara y compleja debido a la necesidad de mantenimiento para obtener los datos de transpiración (Sánchez *et al.*, 2008).

La pérdida de agua simultanea por la evaporación del suelo y la transpiración de la planta se denota por un proceso conocido como evapotranspiración (ET). La evaporación del suelo, es una pérdida directa del agua del suelo a la atmósfera a través de la superficie del mismo. En contraste

con la pérdida de agua por la transpiración de las plantas es de forma indirecta. La transpiración envuelve la entrada del agua en las plantas a través de las raíces, donde el agua atraviesa el follaje donde finalmente se evapora y se pierde a la atmósfera principalmente a través de unos poros pequeños en las hojas conocidos como estomas (Teh, 2006).

La evaporación del agua es el cambio del agua a vapor, por lo que para ello se necesita una cierta cantidad de calor para tal conversión. La energía requerida se le conoce como calor latente. Se le llama latente porque no es posible sentirse su calor y este no cambia a la temperatura durante la conversión del estado líquido al vapor. La energía suministrada es para romper la molécula del agua y hacer que la atracción de sus componentes sea mínima, mientras la temperatura no es afectada, razón por la cual no es posible medir el calor latente con un termómetro (Teh, 2006).

Gerosa (2011) menciona que la transpiración es afectada por la radiación interceptada y las diferencias entre la presión real de vapor del aire y la presión del vapor del aire a saturación a la temperatura de la hoja (déficit de presión de vapor del aire-hoja), la conductividad a la transferencia del agua del interior a la superficie de la hoja (conductancia estomática) y la conductividad de la transferencia del agua de la superficie de la hoja al aire (conductancia aerodinámica).

2.5 Importancia de la transpiración

La concentración del agua en las plantas se debe mantener dentro de un rango estrecho para mantener un crecimiento óptimo del cultivo. Una reducción del 10 % puede afectar el funcionamiento y desarrollo de las plantas y en ocasiones causar su muerte. Las plantas usan el agua para varias funciones.

El agua es el componente con mayor concentración en las plantas del orden de 70%- 95% de su peso fresco. Este le provee forma y rigidez, es la principal fuente de disolución de iones, es mediante el cual los nutrientes se transportan del suelo a la planta, es esencial en las reacciones bioquímicas y finalmente debido a su alto calor específico el agua refresca las hojas a través de la evaporación previendo a sí el sobrecalentamiento de las hojas (Gerosa, 2011).

2.5.1 Riego

Katerji *et al.* (1994) y Moriya y Kageyama, (1992) citado por Woo Lee y HoonShin (1998) indican que el manejo apropiado del riego es esencial para mejorar la productividad y calidad de la producción de los cultivos en invernadero, en el cual la precipitación es obstruida por la cubierta. El tiempo exacto y la intensidad de riego son dos factores determinantes en el manejo eficiente del riego. El tiempo de riego se puede determinar con base al contenido de humedad del suelo y contenido de agua en el cultivo. Sin embargo, la segunda opción es el mejor criterio ya que refleja directamente la condición fisiológica. Se requiere un monitoreo continuo y no destructivo para determinar el tiempo de riego de acuerdo al estado hídrico del cultivo. Está

extensamente aceptado que la variación del diámetro del tallo de los cultivos refleja no solo el crecimiento sino además el estado hídrico del mismo.

Los sistemas de riegos existentes, riegan con cantidades fijas de agua sin considerar lo que la planta realmente necesita. Sin embargo, es razonable suministrar el agua que el cultivo consume por efecto de la transpiración. Los modelos de transpiración pueden ser empleados para estimar la cantidad de agua que debe ser suministrada en un sistema de riego (Woo Lee y HoonShin, 1998), como la propuesta de riego dado por (Martínez, 2008) usando un modelo empírico donde se relacionó con radiación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento.

Woo Lee y HoonShin (1998) calibraron un modelo para predecir la transpiración considerando el microclima del invernadero y el crecimiento del cultivo con el fin de ser usados para control de riego. En el trabajo mencionado el tiempo de riego se determinó con el monitoreo continuo del diámetro del tallo de un cultivo de jitomate, usando estos dos índices el tiempo y cantidad de riego indicaron que es posible tener un control óptimo del riego. Estos autores concluyen que la micro variación del diámetro del tallo refleja el estado hídrico de la planta y teniendo un modelo capaz de predecir la transpiración se puede hacer un manejo eficiente de un sistema de riego automatizado.

Para asegurar el uso eficiente del agua es necesario proponer calendarios de riegos de acuerdo al requerimiento hídrico del cultivo. El consumo de agua se determina principalmente por la transpiración ya que el

agua que se retiene en las plantas para otros usos es muy pequeña. Particularmente, es importante suministrar suficiente agua durante condiciones de alta insolación cuando la transpiración de las plantas es más alta (Bailey *et al.*, 1993).

2.5.2 Control ambiental

Los más avanzados equipos automáticos de control climático y la mejor comprensión de los procesos que intervienen en el clima de los invernaderos, han dado la posibilidad de controlar el clima en los mismos en las últimas décadas. En el futuro una estrategia de control óptimo dará la pauta para hacer una optimización económica en los sistemas de producción en invernaderos. La aplicación de la nueva teoría de control requiere encontrar una solución a un problema multivariado de tal manera que lo que se quiera maximizar sea la producción, este enfoque está aún en fase experimental. El desarrollo de los modelos matemáticos ha desencadenado la investigación centrada en el comportamiento físico y dinámico del clima en invernadero relacionándola con la producción (Stanghellini y Jong, 1995).

Recientes estudios han mostrado que para cultivos de jitomates en invernadero en condiciones de altos niveles de humedad y bajo niveles de luz hay una reducción de transpiración lo que conduce a una disminución del rendimiento. Estos efectos adversos podrían evitarse controlando apropiadamente las condiciones ambientales de los invernaderos (Jolliet y Bailey, 1992).

2.6 Métodos para la estimación de la transpiración

Existen diversos métodos para la estimación de la evapotranspiración de los cultivos, muchos de los cuales han sido ampliamente estudiados en condiciones al aire libre. A continuación se describen los más destacados haciendo especial mención a los métodos de mayor utilidad para las condiciones particulares existentes dentro de un invernadero.

2.6.1 Directos

Los métodos directos tratan de evaluar la cantidad de la evapotranspiración mediante balance de masa de agua y la medición de forma directa de alguno de los términos que intervienen en el balance. Dentro de estos se encuentran el método del porómetro, medida del flujo de savia, lisímetro y balance de vapor de agua.

2.6.2 Indirectos

En estos están los métodos climatológicos que se basan en la utilización de fórmulas empíricas o modelos teóricos para realizar estimaciones de la capacidad evaporativa de un ambiente determinado a partir de datos obtenidos de una estación meteorológica. Estas ecuaciones predicen la evapotranspiración potencial o de referencia (Valera *et al.*, 2002). Entre estas están la que tienen que ver con la radiación, tanque evaporímetro, las ecuaciones de Penman-Monteith, Baille, Takakura, etc.

2.7 Modelación matemática

Un modelo es una representación simplificada de un sistema real. Cuando un sistema se describe en forma simple el modelo se convierte en una herramienta para entender el sistema y ayuda a examinar su complejidad basándose en los aspectos más importantes. Esta representación simplificada describe al sistema mediante el uso de principios matemáticos en forma de ecuaciones. Además que nos ayuda a comprender el sistema, permite de una manera organizada predecir y controlar el sistema, consecuentemente un modelo matemático provee una herramienta para resolver problemas (Teh, 2006).

En los últimos años diferentes modelos han sido desarrollados y probados por diferentes autores. Estos modelos permiten obtener una estimación precisa de la tasa de transpiración donde los más sofisticados se basan en la transpiración de una hoja (dosel) y en el balance de energía en las hojas, en el cual, la transpiración depende de la resistencia del dosel como fue propuesto inicialmente por Penman y posteriormente modificado por Monteith, donde toman en cuenta la resistencia estomática. No obstante el uso de la fórmula completa de Penman-Monteith (P-M) requiere del conocimiento de varios parámetros de entrada que no son fácilmente disponibles. Particularmente la resistencia estomática y la resistencia aerodinámica tienen que ser conocido para diferentes cultivos, (Gerosa, 2011).

Sánchez *et al.*, (2008) presenta dos modelos (modelo estático de caja gris y modelo dinámico de caja negra), basados en la ecuación de Penman-

Monteith adaptados a las condiciones del mediterráneo, para predecir la transpiración de jitomate. El primero de ellos presenta la ventaja de ser fácil y de buena aproximación pero con la desventaja de que muestra un retraso entre los valores medidos y estimados además que no es posible obtener los mismos parámetros para cada ciclo de cultivo, teniéndose una relación distinta entre variables para el ciclo primavera verano y otoño invierno. Además varía en función de la etapa fenológica del cultivo por lo que este modelo estático no puede usarse en un sistema de control basado en modelos de predicción. El segundo modelo dinámico de caja negra mostró mejores resultados ya que corrige el problema de retraso, pero presenta el inconveniente que no se puede extrapolar sus resultados a otros cultivos y a otros invernaderos porque su metodología se basa en datos en tiempo real aunque el conocimiento de este último modelo es amplio, lo que lo hace posible de reproducirse en otras condiciones.

Debido a que un modelo es una representación de un sistema real, es de hecho una descripción incompleta e imperfecta ya que de pronto hay información que se pierde cuando el sistema se traslada a un modelo, el modelo no muestra completamente el comportamiento del sistema sino únicamente las partes más esenciales que explican su comportamiento, a si que esta representación incompleta significa que la estimación y simulación de un modelo matemático está sujeto a errores. El grado de error depende de la información que se pierde, de los componentes considerados, y de la sobre estimación o subestimación del efecto de cada componente seleccionado.

López *et al.* (2008) compararon el modelo de P-M y el de Stanghellini para predecir la transpiración de un cultivo de tomate en una región semiárida de México, encontrando que en estas condiciones en donde la radiación solar durante el día es alta y presenta baja humedad relativa (alto valor de déficit de presión de vapor) el modelo que mejor predice la tasa de transpiración es la de Stanghellini, y que la ecuación de Penman-Monteith tiende a sobre estimarlos.

2.7.1 Modelos mecanicistas y empíricos.

Existen muchos enfoques para estimar la evapotranspiración indirectamente a partir de tanto modelos empíricos o modelos basados físicamente usando datos meteorológicos fáciles de obtener. El enfoque empírico usa análisis de regresión para identificar correlaciones entre parámetros de entrada y tasa de transpiración. Las deficiencias de este enfoque es que las fórmulas empíricas desarrollados para una región específica durante un periodo específico puede no ser preciso para condiciones distintas (Prenger *et al.*, 2002).

Un modelo mecanicista o basado en procesos, es aquel que se construye del conocimiento de procesos físicos, químicos o biológicos que gobiernan el fenómeno bajo estudio. Estos modelos también son conocidos como modelos explicativos ya que estos representan la relación causa y efecto de las variables. En contraste los modelos empíricos (modelos estadísticos o de correlación) describen la relación entre variables pero ofrecen poca o nula explicación de la relación causa efecto de los procesos del fenómeno (Teh, 2006).

Modelos físicamente basados que usan balances de energía típicamente proporcionan una estimación más generalizada de la transpiración. Sin embargo, la desventaja de estos modelos es que tienen requerimientos de datos que muchas veces no están disponibles o no son medidos (García, 2009).

2.8 Modelos de transpiración

2.8.1 Evaporación desde una superficie húmeda

Para el cálculo de la evaporación de una superficie húmeda debe conocerse la energía necesaria para el cambio de fase desde la superficie y la capa de saturación del aire en contacto con la superficie que debe ser constantemente removida y remplazada por una no saturada (Bakker *et al.*, 1995).

El primer evento está gobernado por la ley de conservación o ecuación de balance de energía, escrita de la siguiente manera.

$$R_n - H - LE = 0 \quad (2.1)$$

Donde:

R_n es la densidad de flujo de la radiación disponible [W m^{-2}]; H es la densidad de flujo de calor sensible transferido entre el cultivo y el aire [W m^{-2}]; LE es el flujo de calor latente debido a la transpiración, L es el calor de vaporización del agua [J kg^{-1}] y E es la densidad de flujo de calor [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$].

La analogía con la ley de difusión implica que la densidad de flujo de vapor E que se evapora de la superficie es proporcional al gradiente de concentración de vapor entre la superficie y el aire libre, la constante de

proporcionalidad será el coeficiente de transferencia km o la conductancia, g_b [$m\ s^{-1}$], de la capa de aire a lo largo de la superficie (Bakker *et al.*, 1995), también puede definirse como el inverso de la resistencia [$r_b\ ms^{-1}$], en consecuencia:

$$E = g_b(\chi_s - \chi_a) = \frac{1}{r_b} \frac{\rho_a C_p}{\gamma L} (e_s - e_a) \quad (2.2)$$

Donde: ρ_a es la densidad del aire [$kg\ m^{-3}$], C_p calor específico del aire [$J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$], γ es la constante psicrométrica [$Pa\ ^\circ C$], L calor latente de vaporización [$kJ\ kg^{-1}$], e_s presión de vapor a saturación [Pa], e_a presión real de vapor [Pa], r_b es la resistencia aerodinámica [$m\ s^{-1}$], los subíndices hacen referencia a la superficie y al aire respectivamente. Como la superficie es húmeda.

$$e_s = e(T_s) \quad (2.3)$$

Donde T_s es la temperatura de la superficie que generalmente es desconocida. Una ecuación para esto puede encontrarse observando que la transferencia de calor es gobernada por una ley semejante a la del flujo de vapor. La cantidad de transferencia de calor y vapor del aire tiene lugar casi en el mismo rango, dada la similitud del coeficiente de difusión del aire. Se tiene:

$$H = \rho_a C_p \frac{T_s - T_a}{r_b} \quad (2.4)$$

Donde T_a es la temperatura del aire.

El sistema formado por las ecuaciones (2.1), (2.2), (2.3), (2.4), puede resolverse para la tasa de transpiración únicamente por un método numérico, una elegante solución la obtuvo Penman en 1948.

Penman observó que la temperatura de la superficie no difiere mucho de la temperatura del aire y $e(T_s)$, y puede aproximarse con los primeros dos términos de la expresión de Taylor,

$$e(T_s) \approx e(T_a) + s(T_a)(T_s - T_a) \quad (2.5)$$

Donde; $s(T_a)$ [$\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$] es la pendiente de la curva de presión de vapor a saturación a la temperatura del aire, en lo sucesivo será expresado por s , si la temperatura del cultivo es muy parecida a la temperatura del aire el teorema de Lagrange asegura que la pendiente en el intervalo contenido entre T_s y T_a se puede calcular además de que ocasiona una linealización casi exacta (Bakker *et al.*, 1995), considerando la ecuación (2.5),

$$LE = \frac{s}{s + \lambda} R_n \frac{\rho_a C_p}{r_b} \frac{D}{s + \gamma} \quad (2.6)$$

El primer término de la ecuación es usualmente llamado “término de energía” representa la evaporación en el aire saturado ($D \rightarrow 0$) debido a la radiación emitida por la superficie. El segundo término llamado “término aerodinámico” representa la evaporación adiabática, que es la evaporación causada únicamente por la pérdida de saturación del aire, donde D es el déficit de saturación [Pa] (Bakker *et al.*, 1995).

2.8.2 Modelo de Penman-Monteith

La mayoría de los modelos se basan en la ecuación de Penman-Monteith y difieren principalmente en el método para calcular la radiación neta, conductancia aerodinámica y conductancia estomática (Bakker *et al.*, 1995; Allen *et al.*, 1998). Dicha ecuación está basada en principios físicos y el enfoque es visto entre estudios de fisiología vegetal y física del ambiente (Ramírez, 2005).

Monteith (1965) observó que dentro de la hoja, esta se comporta como una superficie húmeda, usualmente conocida como superficie interna de la cavidad sub estomática (Bakker *et al.*, 1995). Una hipótesis importante de este modelo es que toda la cubierta vegetal se puede considerar como una gran hoja desde la que se escapan el calor y el vapor de agua (Allen *et al.*, 1998) y por lo tanto la transpiración puede ser calculada empleando las ecuaciones anteriores considerando además la resistencia estomática (r_s) antes de la superficie externa de la hoja y la capa límite (r_b) (Bakker *et al.*, 1995).

$$LE = \frac{\rho_a C_p}{r_b} \frac{e_s - e_a}{r_s + r_b} \quad (2.7)$$

La ecuación de transferencia de calor no necesita ser rescrita debida a la alta conductividad térmica de los tejidos de la hoja, la temperatura interna de la hoja puede considerarse igual a la de la superficie externa de la misma (Bakker *et al.*, 1995).

$$LE = \frac{sR_n + \rho_a C_p D}{s + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_b} \right)} \quad (2.8)$$

Esta es la célebre ecuación conocida como de Penman-Monteith para evapotranspiración potencial (Penman, 1948; Monteith, 1965; Teh, 2006), D es el déficit de presión de vapor y se determina de la ecuación (2.30).

Un problema con el modelo de P-M es que el agua se pierde por evaporación y se asume que ocurre ya sea del suelo o del cultivo pero no ambos simultáneamente, en otras palabras pueden aplicarse a suelos despejados o cultivo totalmente cubierto.

Wang y Boulard (2000) menciona que la transpiración de un cultivo se expresa como la suma de un componente radiativo que es proporcional a la radiación absorbida por el cultivo, y un término advectivo, proporcional al déficit de saturación del aire dentro del invernadero.

La transpiración de una hoja, en consecuencia, es descrita por una ecuación idéntica a la (2.6), para la evaporación de una superficie húmeda (Bakker *et al.*, 1995).

La pérdida de agua del cultivo es la suma transpirada por cada una de las hojas, sin embargo, las diferencias pueden ser importantes debido al microclima de cada una debido a los perfiles verticales de radiación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento dentro del cultivo, conocido como variación horizontal (Bakker *et al.*, 1995).

La ecuación (2.8) indica que la transpiración tiene una respuesta lineal a los parámetros climáticos más importantes radiación solar y déficit de presión de vapor y mas débilmente para temperatura y velocidad del viento (T y u). Por lo tanto puede se calculada considerando a la planta como una gran hoja (Bakker *et al.*, 1995).

El intercambio de calor y masa del cultivo es igual a dos veces el índice de área foliar (LAI) por cada m² de superficie de crecimiento, estas cantidades son las resistencias aerodinámica por transferencia de calor y la resistencia del cultivo por transferencia de masa, rescribiendo la ecuación (2.8) se tiene:

$$LE = \frac{sR_n + 2LAI\rho_a C_p D}{s + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_b}\right)} \quad (2.9)$$

Considerando 2LAI ya que el cultivo de jitomate transpira por ambas caras de la hoja. Donde: s es la pendiente de la curva de presión de vapor [Pa °C⁻¹], R_n es la radiación neta [W m⁻²], γ es la constante psicrométrica =51.5 [Pa °C⁻¹], LAI es el índice de área foliar [adim], ρ_a es la densidad del aire =1.117 [kg m⁻³], C_p es el calor específico del aire = 1003.5 [J kg⁻¹ °C⁻¹], D es el déficit de presión de vapor [Pa], r_s es la resistencia estomática [s m⁻¹], r_b es la resistencia aerodinámica [s m⁻¹], L es el calor latente de vaporización = 2454000 [J kg⁻¹]

La ecuación de Penman-Monteith provee un método general para predecir la tasa de transpiración, pero contiene un número de parámetros para

el cual los valores deben ser seleccionados. Estos incluyen la resistencia estomática y aerodinámica de las hojas (Bailey *et al.*, 1993).

Montero *et al.* (2001) realizó un estudio de la transpiración en geranio y encontró que la ecuación de Penman-Montieth predice acertadamente la tasa de transpiración bajo condiciones de altas temperaturas y déficit de presión de vapor.

2.8.3 Modelo de Stanghellini

El modelo de transpiración en Stanghellini y Jong, (1995) se basa en la ecuación de Penman-Monteith bajo la consideración de que el piso del cultivo es acolchado y que se desarrolla en sistema sin suelo por tanto considera que la evaporación es muy baja y por tanto despreciable, proporcionando una ecuación para la transpiración que se deriva del balance de energía como la ecuación (2.1).

En donde la transferencia del calor sensible y el calor latente se escribe como sigue:

$$H = 2LAI\rho_a C_p \frac{T_{crop} - T_a}{r_b} \quad (2.10)$$

$$H = 2LAI\rho_a C_p \frac{\chi_{crop} - \chi_a}{r_s + r_b} \quad (2.11)$$

Donde: T_{crop} es la temperatura del cultivo,

Resolviendo la ecuación (2.1), (2.10), (2.11) tomando en cuenta la ecuación (2.5) y haciendo un desarrollo algebraico se llega a;

$$E = \frac{2LAI}{(1 + \varepsilon)r_b + r_s} \left[\chi_a^* - \chi_a + \frac{\varepsilon r_b}{2LAI} \frac{R_n}{L} \right] \quad (2.12)$$

Donde:

E es la transpiración [$\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; LAI es el índice de área foliar del cultivo [adim.], L es el calor latente de vaporización del agua [J g^{-1}] su valor es casi constante cerca de 2450 para $T_a = 20^\circ \text{C}$; r_b es la resistencia a la transferencia de calor de la capa límite de la hoja [s m^{-1}]; r_s es la resistencia estomática [s m^{-1}]; R_n es la radiación neta del cultivo es el balance entre la radiación interceptada y la radiación reflejada además del balance de entrada y salida de la radiación de onda larga [Wm^{-2}], ε es la relación del contenido del calor latente y calor sensible de un aire saturado para un cambio de 1°C en la temperatura, para un rango de temperatura de 15 a 30°C y se puede calcular como:

$$\varepsilon = 0.7584 \exp(0.0518 T_a) \quad (2.13)$$

χ_a es la concentración de vapor del aire [g m^{-3}], χ_a^* es la concentración de vapor a saturación a la temperatura del aire [g m^{-3}], que puede aproximarse para temperaturas que van de 15 a 30°C por:

$$\chi_a^* \cong 5.5638 \exp(0.0572 T_a) \quad (2.14)$$

La diferencia $\chi_a^* - \chi_a$ es por lo tanto el déficit de concentración de vapor del aire, cuando se cuenta con mediciones de la humedad relativa (HR) se puede calcular como sigue:

$$\chi_a^* - \chi_a = \frac{100 - HR}{100} \chi_a^* \quad (2.15)$$

Donde: HR es la humedad relativa.

2.8.4 Modelo simplificado de transpiración en invernadero

Para cultivos en invernaderos, la fórmula más actualizada usada hasta ahora para predecir la evapotranspiración está basada en una correlación lineal simple entre la evapotranspiración y la radiación global y el déficit de presión de vapor.

Desde el punto de vista práctico, el modelo de regresión múltiple propuesto por Baille *et al.*, (1994) predice la tasa de transpiración del cultivo a corto plazo, utilizando dos parámetros la radiación incidente sobre el dosel R_g y el déficit de presión de vapor D , los cuales en invernaderos equipados para el control climático, se registran continuamente y el valor de índice de área foliar puede estimarse a partir de correlaciones en las que intervienen las dimensiones de la planta, como su altura o bien o en función de los días después de la siembra.

En el presente trabajo se usó el modelo propuesto por Baille *et al.* (1994), el cual está basado en la ecuación de Penman-Monteith (Goudriaan y van Laar, 1994; Monteith y Unsworth, 2008). Esta ecuación cuando se aplica a cultivos en invernadero (Medrano 2005), Baille *et al.*, 1994, Sánchez *et al.*, 2008, Joliet y Bailey 1992, se describe como sigue:

$$LE = Af_1(LAI)R_g + Bf_2(LAI)D \quad (2.16)$$

Para $f_1 = 1 - \exp(-\alpha LAI)$ y $f_2 = LAI$ por lo finalmente se tiene

$$LE = A(1 - \exp(-kLAI))R_g + B(LAI)D \quad (2.17)$$

Donde E es la tasa de evapotranspiración del cultivo [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$], R_g es la radiación solar incidente [Wm^{-2}], D es el déficit de presión de vapor [Pa], LAI es el índice de área foliar [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$] f_1 y f_2 dos funciones adimensionales de LAI, A y B son parámetros del modelo (A, adimensional; B, [$\text{W m}^{-2} \text{Pa}^{-1}$]). El parámetro A se refiere al término radiactivo y B al término aerodinámico (a veces llamado término advectivo). Por lo tanto A y B también se les conocen como coeficiente de radiación y coeficiente aerodinámico, respectivamente.

2.9 Determinación de variables que intervienen en los modelos.

2.9.1 Radiación neta

Todos los objetos a si como aquellos que tienen temperaturas mayores de 0 K, emitirán radiación, cuerpos frescos como el suelo por ejemplo emiten radiación teniendo longitudes de ondas largas porque estos cuerpos son relativamente más frescos además de que la radiación que emiten son menos energéticas (Bontsema *et al.*, 2007).

Consecuentemente la energía neta disponible en un sistema es la diferencia entre la radiación que entra y la que sale y el modelo para la radiación neta (R_n) se detallan en la siguiente sección.

2.9.2 La radiación neta en un cultivo

Ross (1975) citado por Bontsema *et al.* (2007), propuso un modelo para una planta estándar en un medio turbio donde la transmisión de la radiación solar I_{sun} se describe similarmente lo que sucede en un medio semitransparente, el índice de área foliar (LAI) es el espesor d , y k es el coeficiente de extinción en un cultivo está relacionado con la inclinación que tienen las hojas, figura 2.6.

$$\frac{I_{\text{sun below}}}{I_{\text{sun above}}} = \exp(-kd) \quad (2.18)$$

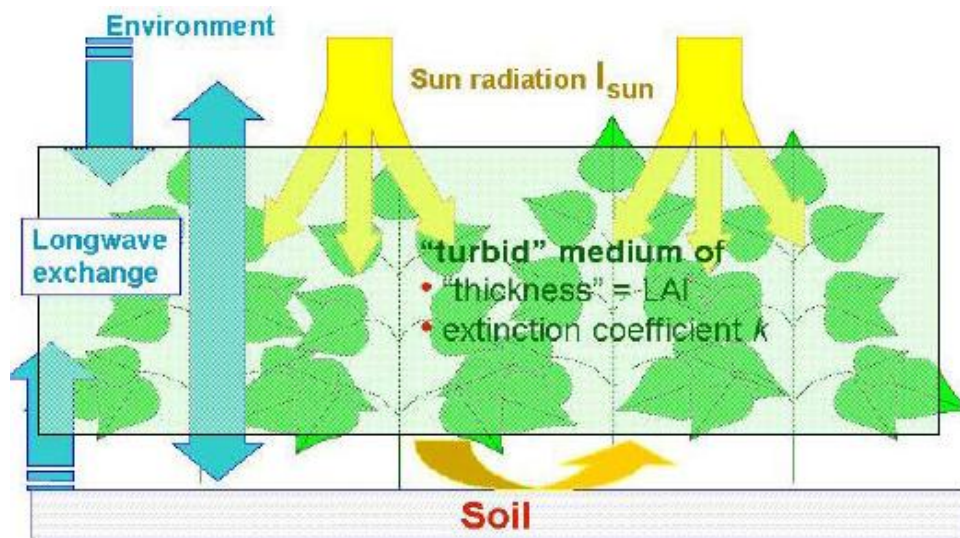


Fig. 2.6. Modelo para una planta estándar en un medio turbio (Ross, 1975).

En el invernadero (casi en condiciones isotérmicas) el intercambio de onda larga se puede ignorar como primera aproximación (Baille *et al.*, 1994), en muchas referencias bibliográficas se han mostrado en la mayoría de las condiciones la contribución de la radiación a la transpiración del cultivo puede estimarse únicamente considerando la radiación de onda corta.

El coeficiente de extinción de la radiación K depende sobre todo de las propiedades ópticas y geométricas (inclinación y disposición de las hojas) de la cubierta vegetal y los valores observados para K varía entre 0.3-1.5 dependiendo de la especie y tipo de porte o en tutorado. Valores menores que la unidad es característicos de hojas no horizontales o agrupadas y valores mayores de la unidad para hojas horizontales y de una distribución más regular en el espacio, (Medrano, 1999).

Stanghellini (1987) extendió la analogía de Ros para cuantificar la reflexión tanto en el cultivo como en el suelo lo cual es relevante para cultivos sembrados en fila como en los invernaderos, ella determinó experimentalmente los coeficientes más importantes para el cultivo de jitomate en acolchado. El modelo final se puede simplificar con poca pérdida de precisión como:

$$Rn = 0.86(1 - \exp(-0.7LAI))I_{sol} \quad (2.19)$$

Donde I_{sol} es la radiación global en la cima del follaje, puesto que usualmente la radiación global se mide fuera del invernadero, este se reduce con la transmisividad térmica del invernadero, típicamente entre 65 y 70%. Fórmulas similares con parámetros específicos se pueden encontrar en otras literaturas como para rosas (Baille, 1994) y pepino (Medrano *et al.*, 2005).

Medrano (1999) indica que la intensidad de radiación dentro del invernadero depende de su localización y su transmisividad, el cual se puede modificar por el tipo de invernadero (geometría y orientación) y por el material de la cubierta empleado (cristal, policarbonato, polietileno, etc.).

La transmisividad térmica del invernadero es difícil de medir debido a la variación espacial dentro del mismo, la existencia de zonas iluminadas y sombreadas dificulta las medidas instantáneas de la transmisividad de la luz directa.

2.9.3 Resistencia estomática (r_s)

El modelo multiplicativo de Jarvis de la resistencia estomática (r_s) se determinaron sus parámetros por el mejor ajuste de los datos de transpiración y clima en un cultivo de jitomate, (Stanghellini and Jong, 1995).

Demrati *et al.* (2007) menciona que la resistencia estomática no depende únicamente de la intensidad de la radiación solar a nivel del cultivo sino que también de la temperatura de la hoja y del déficit de saturación del aire.

Un modelo que combina estos tres factores permite estimar la resistencia estomática con respecto a las variables climáticas (Jarvis, 1976; citado por Demrati *et al.*, 2007).

$$r_s = (R_g, T, D) = r_{\min} f_1(R_g) f_2(T) f_3(D) \quad (2.20)$$

Donde;

$r_{\min}$ es la resistencia interna mínima en $s\ m^{-1}$ y f_1 , f_2 , f_3 son funciones matemáticas que representan la evolución de la resistencia estomática (r_s) de acuerdo a las variables climáticas consideradas, R_g es la radiación global. Para el cultivo de jitomate en invernadero, Boulard *et al.* (1991) argumenta que la resistencia estomática puede modelarse correctamente haciendo uso de sólo

dos factores uno de los cuales puede ser la radiación global por lo tanto un modelo de dos factores que se puede adoptar son: (R, T) o bien (R_g, D).

$$r_s = r_{\min} f_1(x_1) f_2(x_2), \quad (2.21)$$

Demrati *et al.* (2007) encontró que los valores de resistencia estomática en cultivo de plátano, durante la noche son casi constantes y alcanzan valores máximos de aproximadamente 15 s cm⁻¹ y corresponde a condiciones en el que los estomas están cerrados. Durante el día la resistencia estomática decrece a medida que el nivel de luz aumenta y oscila entre 2 y 5 s cm⁻¹ durante periodo diurno completo.

Jolliet y Bailey (1992) y Baille *et al.* (1994b) mostraron que al introducir la conductancia estomática como variable existe una mejora entre los valores de transpiración medidos y lo estimados por los modelos que consideran a la radiación solar y el déficit de presión de vapor como datos de entrada.

Yang *et al.* (1990) encontraron que para pepino una buena representación de la resistencia estomática se puede obtener usando únicamente la radiación solar. Al igual que Montero *et al.* (2001), encontraron que no hubo una reducción de la resistencia estomática con el aumento de la temperatura del aire y el déficit de presión de vapor en un cultivo de geranio. Por lo tanto, el cálculo de la tasa de transpiración en las condiciones experimentales la resistencia interna se midió en función de únicamente de la radiación PAR incidente.

Mientras que Stanghellini (1987) para determinar la resistencia estomática considera como variables de entrada la radiación solar, déficit de presión de vapor, temperatura del aire, y la concentración del dióxido de carbono.

Joliet y Bailey (1992) en un experimento donde compararon cinco modelos distintos para predecir la transpiración confirmaron la hipótesis que considerar valores constantes de la conductancia estomática durante el día y la noche es un error ya que conduce a una falsa predicción de la influencia del déficit de presión de vapor sobre la transpiración. Esto conlleva a aceptar que la influencia del déficit de presión de vapor sobre la conductancia estomática debes ser tomado en cuenta cuando se pretende predecir la transpiración. De acuerdo los resultados obtenidos los modelos que mejor predijeron la transpiración fueron los que consideraron la influencia de la radiación solar y el déficit de presión de vapor sobre la conductancia estomática.

La resistencia estomática r_s [$s\ m^{-1}$] se modela con la relación empírica propuesto por Boulard *et al.* (1991), en función de la radiación global en el interior del invernadero que alcanza el cultivo R_g [$W\ m^{-2}$] y déficit de saturación de vapor de agua del aire D [Pa] (Wang y Boulard, 2000):

$$r_s = c_1 \left\{ 1 + \frac{1}{\exp[c_2(R_g - c_3)]} \right\} \left\{ 1 + c_4 \exp \left[c_5 \left(\frac{D}{c_6} - c_7 \right) \right] \right\} \quad (2.22)$$

Donde: $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7$ son coeficientes de la ecuación experimental.

La conductancia estomática y de la hoja son parámetros proporcionalmente relacionados con el intercambio del agua y el dióxido de carbono, la conductancia de la hoja es la suma de la conductancia estomática y la conductancia cuticular. El término conductancia se usa cuando se considera la magnitud de la transpiración y absorción de CO₂, el término resistencia se usa cuando se considera el control que los estomas ejercen al flujo, comparados con otras resistencias (Bakker *et al.*, 1995).

Stanghellini (1998) citado por (Bontsema *et al.*, 2007) retoma la temperatura para calcular la resistencia estomática en lugar del déficit de presión de vapor, quedando la ecuación de la siguiente forma:

$$r_s = c_1 \frac{\frac{R_n}{2LAI} + c_2}{\frac{R_n}{2LAI} + c_3} \left(1 + c_4 (T_a - 24.5)^2 \right) \quad (2.23)$$

Las unidades ya han sido definidas, c_1 , c_2 , c_3 , c_4 son coeficientes de la ecuación experimental que se pretende calibrar.

No obstante (Stanghellini, 1987) citado por (Villarreal *et al.*, 2012) muestra otra ecuación donde considera la radiación neta y el déficit de presión de vapor para determinar la resistencia que en este apartado se discute.

$$r_s = c_1 \frac{\frac{R_n}{2LAI} + c_2}{\frac{R_n}{2LAI} + c_3} \left(1 + c_4 D^2 \right) \quad (2.24)$$

Donde: c_1 , c_2 , c_3 , c_4 son coeficientes de la ecuación experimental que se pretende calibrar.

(Villarreal *et al.*, 2012) de una calibración encontró los valores para c_1 , c_2 , c_3 , c_4 para jitomate y estos son 18.6, 197.5, 0.31 y 1.2×10^{-6} , respectivamente.

Baptista *et al.*(2010) y Joliet y Bailey (1992) al igual que autores antes mencionados han desarrollado y usado una expresión ligeramente distinta para determinar la resistencia estomática en jitomate relacionando la resistencia interna con la radiación solar (R) y el déficit de presión de vapor D a la temperatura de la hoja, teniéndose la siguiente expresión:

$$r_i = \left[0.0041 \left(1 - 0.66 \times \left(\frac{200}{R + 200} \right) - 0.22 D_{leaf} \right) \right]^{-1} \quad (2.25)$$

2.9.4 Resistencia aerodinámica (r_b)

Valera *et al.* (2002) menciona que uno de los objetivos de encerrar un cultivo dentro de un invernadero es prevenir el intercambio vertical de calor con las capas de aire más frías. Que asegura que la existencia de un perfil de viento impide adoptar éste como el origen de transferencia de calor y masa entre el dosel y el aire circundante. La teoría de transferencia de calor, sin embargo, permite concluir que en la mayoría de los casos, la transferencia alrededor de las hojas dentro de un dosel de invernadero viene determinado por el movimiento de aire que se origina en otra parte del invernadero y que se puede ver incrementada por una diferencia de temperatura entre las hojas y el aire.

Stanghellini (1987) determinó los parámetros de un modelo para la resistencia de la capa límite basado en la velocidad del aire y las dimensiones de la hoja. Ella también mostró que una variación relativamente pequeña en el movimiento del aire dentro del invernadero asegura valores de la resistencia de la capa límite casi constante, además de que en tales condiciones del invernadero es bastante insensible la tasa de transpiración a la resistencia de la capa límite, por lo que no hay mucha pérdida de precisión para un valor constante para esta resistencia. Los valores típicos para un invernadero estándar (sin ventilación forzada) se muestran en el cuadro 2.2.

Valores típicos de resistencias estomáticas mínimas, resistencia de la capa límite e LAI en cultivos de invernaderos en Holanda.

Cuadro 2.2. Valores de resistencias estomáticas y aerodinámicas

Cultivo	r_s [$s\ m^{-1}$]	r_b [$s\ m^{-1}$]	LAI [$m^2\ m^{-2}$]
Jitomate	200	200	3
Pimiento	200	300	4
Pepino	100	400	5
Berenjena	100	350	4

La resistencia aerodinámica r_b depende principalmente de un régimen aerodinámico que prevalece en el invernadero. Si se considera que la fuerza de empuje que existe con respecto a la velocidad del viento es despreciable, r_b se puede expresar con respecto al promedio de la velocidad del aire en el interior del invernadero, (Wang and Boulard, 2000),

$$r_b = c_8 \frac{d^{0.2}}{V_i^{0.8}} \quad (2.26)$$

$$d = \frac{2}{\left(\frac{1}{l}\right) + \left(\frac{1}{w}\right)} \quad (2.27)$$

Donde:

r_b es la resistencia aerodinámica [$s \, m^{-1}$], d es la dimensión característica de la hoja, V_i es la velocidad del aire en el interior del invernadero [$m \, s^{-1}$], c_8 es el parámetro de la ecuación que se quiere calibrar, l es la longitud de la hoja [m], w ancho de la hoja [m].

Villarreal *et al.* (2012) encontró valores para la resistencia aerodinámica de $259 \, s \, m^{-1}$ y $185 \, s \, m^{-1}$ para pimienta y jitomate, respectivamente.

2.9.5 Presión de vapor del aire

La humedad del aire se puede expresar de diferentes formas, masa de agua por unidad de volumen, por unidad de masa de aire o como la presión parcial de vapor de agua en el aire. La cantidad de vapor de agua que puede existir en un volumen determinado de aire depende directamente de la temperatura, la presión que ejerce el contenido máximo de vapor de agua a una temperatura dada se le denomina presión de vapor a saturación (Medrano, 1999).

La presión de vapor a saturación es la presión de vapor debido al agua cuando el aire se satura con agua (el aire contiene la máxima cantidad del agua a cierta temperatura) la relación de la presión de vapor a saturación mantiene

una relación exponencial con la temperatura teniéndose como ecuación lo siguiente (Teh, 2006).

$$e_s(T_a) = 610.8 \exp \left[\frac{17.27T_a}{T_a + 237.3} \right] \quad (2.28)$$

La presión de vapor del aire se calcula comúnmente de la humedad relativa (HR), este se define como la relación entre la presión de vapor actual y la presión de vapor a saturación, expresado en porcentaje (Teh, 2006).

$$HR = 100 \frac{e_a}{e_s(T_a)} \quad (2.29)$$

Donde: e_a es la presión de vapor actual [Pa]; $e_s(T_a)$ es la presión de vapor a saturación [Pa] a la temperatura del aire T_a [°C].

A la diferencia de la presión de vapor a saturación y la presión de vapor actual del aire se le conoce como déficit de presión de vapor y se denota por la letra D y representa un grado de insaturación de agua en el aire y se representa mediante la siguiente expresión:

$$D = e_s(T_a) - e_a \quad (2.30)$$

Medrano (1999) menciona que calcular los flujos de masa que entran y salen del invernadero, la humedad se expresa en unidades de masa (kg m^{-3} o kg kg^{-1} aire), sin embargo cuando se considera las respuesta de las plantas a la

humedad las medidas se suelen expresar en déficit de presión de vapor (D). La humedad relativa es muy utilizada en la práctica, pero este valor es de limitada importancia ya que no está directamente relacionado con la demanda evaporativa del aire. A un valor constante de humedad relativa un aumento de la temperatura implica un aumento del déficit de presión de vapor, este es un indicador más sensible de las condiciones de vapor del aire y varia en un rango bastante amplio con los cambios de temperatura.

La pérdida de agua de las hojas está gobernada por el gradiente de presión entre la hoja y el aire que la rodea y este depende mayoritariamente del déficit de presión de vapor.

2.9.6 Pendiente de la curva de presión a saturación (s)

Para el cálculo de la transpiración se requiere calcular la pendiente de la relación entre la presión de saturación de vapor y la temperatura, la pendiente de la curva a una temperatura dada esta dada por la ecuación (Allen, 2006),

$$s = \frac{4098 \left[610.8 \exp \left(\frac{17.27 T_a}{T_a + 237.3} \right) \right]}{(T_a + 237.3)^2} \quad (2.31)$$

Donde: s es la pendiente de la curva de presión de saturación de vapor a la temperatura T_a [Pa °C⁻¹]; T_a es la temperatura del aire [°C].

También se puede calcular usando la siguiente ecuación según (ASAE Standards 1998; Villarreal *et al.*, 2012),

$$s = 41.45 \exp(0.061T_a) \quad (2.32)$$

Las variables tienen las mismas unidades que la ecuación anterior.

2.9.7 Calor latente de vaporización (L)

La cantidad de agua requerida para convertir 1 kg de agua líquida a vapor, bajo temperatura y presión constante es 2454000 J (a 20 °C) este valor es conocido como el calor latente de vaporización del agua y usualmente se denota por el símbolo λ o L en el estudio de la evapotranspiración, aunque (Allen, 2006) indica que este valor cambia con la temperatura, ya que cuanto más elevada sea la temperatura, menos energía será requerida. Para fines prácticos se considera un valor constante ya que varía levemente dentro de rangos de temperaturas normales. La evapotranspiración a menudo se expresa por la cantidad de agua que se pierde en peso por unidad de área por unidad de tiempo ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Además en estudios de evapotranspiración es conveniente expresar la ET en términos de energía para ello se multiplica por L [J kg^{-1}] para tener LE el cual es la densidad de flujo de calor latente [$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$ o W m^{-2}], (Teh, 2006). La ecuación que permite obtener el calor latente en función de la temperatura es el siguiente;

$$L = 2.501 - (2.361 \times 10^{-3})T_a \quad (2.33)$$

Donde L es el calor latente de vaporización [MJ kg^{-1}], T_a es la temperatura del aire [$^{\circ}\text{C}$].

2.9.8 Índice de área foliar

Debido a que el índice de área foliar interviene en la intercepción de la radiación, que es uno de los factores determinantes de la transpiración del cultivo, dicha tasa de transpiración estará ligada de cierta forma u otra a la evolución del índice de área foliar (IAF).

De Graaf y Van den Ende (1981) citado por Medrano (1999) aportaron correlaciones en cultivos de lechuga, tomate y pimiento en diferentes fase de desarrollo, en pimiento la transpiración aumentaba con el IAF hasta alcanzar la fase de máxima intercepción de radiación, a partir de este momento y en adelante la transpiración disminuye gradualmente, es decir disminuye el % de radiación que se convierte a calor latente mediante la transpiración.

Baille *et al.* (1994) han destacado la influencia del IAF en plantas ornamentales y como a medida que aumenta el IAF aumenta la tasa de transpiración, en situaciones con el mismo nivel de radiación.

Todas las hojas tienen la misma dependencia al DPV ambiental. Sin embargo, la transpiración de las hojas situadas en la zona superior de las plantas serán más sensible a los cambios de radiación solar que las hojas de la parte inferior al estar estas últimas más sombreadas (Medrano, 1999).

Katsoulas *et al.* (2002) comenta que el desarrollo de valores altos de índice de área foliar son recomendables durante periodos de cultivos de verano en invernaderos de zonas áridas ya que según los resultados experimentales mostraron que un denso follaje y un suministro adecuado de agua son

efectivos para evitar un fuerte estrés hídrico en plantas cuando en los invernaderos no se cuenta con sistemas de enfriamiento.

2.10 Evaluación de modelos

El objetivo de una evaluación es determinar el ajuste del modelo, el resultado de una evaluación puede incluir comparación gráfica de los valores observados y estimados, mediciones numéricas de las conclusiones cuantitativas de la calidad del modelo (Wallach *et al.*, 2006).

2.10.1 Importancia de la evaluación de un modelo

Wallach *et al.* (2006) menciona que la evaluación de un modelo es importante por varias razones, primero el simple hecho de decidir evaluar un modelo obliga a la persona responder algunas preguntas básicas incluyendo cual es el objetivo de éste, cual es el rango de condiciones en que se puede aplicar, que nivel de calidad puede ser aceptado.

Segundo, el mejoramiento de un modelo es imposible sin una evaluación, en la ausencia de una medida de calidad del modelo no hay forma de decidir si es el modelo que se busca, o si se hacen modificaciones al mismo no hay forma de saber si existe una mejoría, como puede verse la evaluación de un modelo no solo es un indicador de la calidad, sino también se pueden cuantificar los errores que son resultados por diferentes causas (Wallach *et al.*, 2006).

Una parte esencial de la evaluación de los modelos es la comparación de las predicciones del modelo con los datos observados, esto puede ayudar a identificar problemas y brindar ideas para su mejoramiento. Esta técnica es

extremadamente útil para proveer un resumen rápido de los datos y la comparación de estos con el modelo (Wallach *et al.*, 2006).

2.10.2 Gráfica de predicción de modelos versus valores observados

Probablemente la más extendida representación gráfica de ajuste entre los valores medidos y calculados por el modelo es la gráfica 1:1 en donde se muestra que si no hay error, los valores medidos y calculados por el modelo son idénticos y entonces cada punto se situará sobre la línea 1:1. La ventaja de este tipo de gráfica es que se puede observar fácilmente el ajuste de los valores calculados versus medidos. En ocasiones existe una tendencia a subestimar el nivel de error, el ojo tiende a evaluar la distancia más corta del punto de la línea 1:1 pero el error del modelo está dado por la vertical o equivalente a la distancia horizontal del punto a la línea (Wallach *et al.*, 2006).

En algunas ocasiones, se muestra la línea de regresión entre los valores calculados y medidos además o en lugar de la línea 1:1. Calcular la regresión puede ser útil, sin embargo incluir la línea de regresión en una gráfica de este tipo parece más engañoso que útil. Si los puntos caen cercano a la línea de regresión, se puede tener la impresión que el modelo es bastante bueno, pero de hecho no es una medida del error del modelo (Wallach *et al.*, 2006).

2.10.3 Gráfica de residuos

Un método clásico de examinar los errores de los modelos en estadística es graficar estos errores (la diferencia entre los valores medidos y calculados) en el eje de las ordenadas contra valores medidos en eje de las abscisas, este

tipos de gráficas a menudo son vistas en modelos de cultivos. La ventaja que existe entre este tipo de gráfica y el 1:1 es que el error del modelo aparece directamente. Además de que son más fáciles de evaluar y comparar (Wallach *et al.*, 2006).

La gráfica de residuos es muy importante para atraer la atención de patrones sistemáticos en los errores.

Si el modelo se especifica correctamente podría no haber tendencias en los errores, si los residuos si muestran alguna tendencia sistemática, entonces hay un efecto en las variables explicativas los cuales no han sido tomado en cuenta en el modelo.

La gráfica de residuales muestra además la variabilidad del error del modelo el cual es importante para la estimación de parámetros. La hipótesis más simple es que el error del modelo tiene de promedio cero y una varianza constante. La gráfica de residuo permite examinar visualmente cuando tal hipótesis es razonable.

2.10.4 Medidas de ajuste simple entre valores medidos y estimados

La cantidad base de medida de ajuste entre el modelo y las observaciones es la diferencia entre ambas y se expresa como;

$$D_i = Y_i - \hat{Y}_i \quad (2.34)$$

Donde:

Y_i es el valor medido para la posición i , $\hat{Y}_i$ corresponde a valor estimado por el modelo y D_i es el residual del modelo o error.

Hay dos medidas clásicas de ajuste que eliminan el problema de la compensación entre una sobre predicción o sub predicción. El primero y el más ampliamente usado es el promedio del cuadrado del error que se define como;

$$MSE = \left(\frac{1}{N} \right) \sum_{i=1}^N (D_i)^2 \quad (2.35)$$

A menudo es conveniente trabajar con la raíz cuadrada de MSE llamado la raíz de cuadrado medio del error

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (2.36)$$

La ventaja de RMSE es que tiene las mismas unidades que la variable Y (variable dependiente) además que es fácil de entender.

Willmott (1981) citado por Wallach *et al.* (2006) propuso un índice de ajuste que se define como;

$$Index = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N \left(\left| \hat{Y}_i - \bar{Y} \right| + \left| Y_i - \bar{Y} \right| \right)^2} \quad (2.37)$$

El numerador es el cuadrado medio del error (MSE). El denominador está relacionado a la variabilidad de los valores medidos y calculados. Si el modelo es perfecto entonces el índice = 1.

Otra medida de bondad ajuste útil para evaluar la efectividad del modelo es el coeficiente de correlación.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N \left[\left(Y_i - \bar{Y} \right) \left(\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}} \right) \right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\left(Y_i - \bar{Y} \right)^2 \right] \sum_{i=1}^N \left[\left(\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}} \right)^2 \right]}} \quad (2.38)$$

Capítulo 3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

- ✓ Simular y calibrar modelos matemáticos para la transpiración de un cultivo de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo invernadero en el centro de México.

3.2 Objetivos particulares

- ✓ Calibrar y validar la ecuación de Penman Monteith modificado por Stanghellini, utilizando los modelos para las resistencias propuestas por: Stanghellini (Bontsema *et al.*, 2007), Wang y Boulard (2000) y Villarreal *et al.* (2012).
- ✓ Calibración y validación de un modelo simplificado de la ecuación de Penman-Monteith derivado por Baille *et al.* (1994).

Capítulo 4. MATERIALES Y METODOS

4.1 Cultivo

El cultivo con el que se trabajó en esta investigación fue jitomate, una especie característica de la producción en invernaderos y la superficie dedicada a su cultivo, la convierte en la hortaliza número uno en el mundo. Es una planta arbustiva e indeterminada, puede tener un ciclo de vida superior a un año, aunque se cultiva como anual. Para invernaderos se utilizan las variedades de crecimiento indeterminado, pues permiten tener productividad durante periodos largos si se maneja de manera adecuada. El manejo de cultivo es una clave para obtener altos rendimientos y calidad del fruto. Las plantas de tomate en invernaderos requieren de un manejo intensivo, las decisiones a tomar se relacionan con la fenología y la respuesta fisiológica a las variables ambientales.

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) pertenece a la familia de las solanáceas posee semillas de forma lenticular con dimensiones de aproximadamente de 5 x 4 x 2 mm y está constituido por el embrión, el endospermo, y la testa. El proceso de germinación está muy influenciado por la temperatura, el rango óptimo se encuentra entre 18 y 29.5 °C la temperatura mínima está entre 8 y 11 °C y la máxima es de 35 °C. El sistema radical del tomate consta de una raíz principal y gran cantidad de ramificaciones secundarias, en los primeros 30 cm del suelo se encuentra el 70% de la

biomasa radical, bajo condiciones de suelo la raíz crece 2.5 cm diarios hasta llegar a los 60 cm de profundidad. El tallo es el eje sobre el cual se desarrollan las hojas, flores y frutos por ello es importante vigilar su vigor y su sanidad, el tallo está cubierto por vellosidades que salen de la epidermis mismas que expiden un aceite oloroso que al desprenderlo sirve de protección al tallo, (Castellanos, 2009).

El tomate posee hojas que tienen un eje central o peciolo que se utiliza para el monitoreo nutricional y de este eje salen pequeñas hojitas llamadas foliolos. Se le llama simpodio a un sector del tallo compuesto de tres hojas y un ramillete floral para el caso de crecimiento indeterminado. Las flores aparecen en racimos, siendo sencillos en la parte baja y después más dividido y ramificados, las flores son pequeñas, pedunculadas, de color amarillo y forman corimbos. El fruto tiene dos o más lóculos, se desarrolla a partir de un ovario de 5 a 10 mg y alcanza un peso final en la madurez que oscila entre los 5 y 500 g en función de la variedad y las condiciones de desarrollo (Castellanos, 2009).

La variedad con el que se trabajó en el experimento fue "*Rafaelo*" de crecimiento indeterminado, el siembra se realizó el 7 de abril de 2011 en charolas de polietileno de 200 cavidades y se trasplantó el 7 de mayo del mismo año. Se realizaron las labores culturales necesarios para tener un cultivo en condiciones representativas a los invernaderos comerciales. Estas labores comprendieron desde el trasplante, entutorado, deshoje, deschupone, aplicaciones de agroquímicos, cosecha y empaque (Figura 4.1).



Fig. 4.1. Cultivo de jitomate en invernadero

4.2 Estructura

El experimento se estableció en un invernadero tipo sierra (Figura 4.2) con ventilación cenital, localizada en el campo experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, con ubicación geográfica $19^{\circ} 29'$ latitud Norte y $98^{\circ} 53'$ longitud Oeste, y a una altitud de 2240 m. El invernadero tiene una orientación N-S y está cubierto de una capa de plástico calibre 700 tratado contra los rayos ultravioleta, está constituido por tres naves cuyas dimensiones son de 8.5 x 76 m con un área total de 1938 m². Cuenta con tres ventanas cenitales, dos ventanas laterales y dos ventanas frontales. Las ventanas laterales miden 2 x 76 m, las ventanas frontales 2 x 25.5 m y las ventanas cenitales 1.6 x 76 m. todas las ventanas están cubiertas con mallas antiáfidos de 25 x 40 hilos/in² para evitar la entrada de insectos. La apertura y cierre de ventanas se realiza en forma semi-automática. El invernadero cuenta con un sistema de riego por goteo con goteros auto compensados con adaptadores de cuatro salidas, cada salida con su respectivo tubín y estaca que son colocados en cada maceta.

Además, cuenta con un temporizador para aplicación de riegos e inyección de fertilizantes.



Fig. 4.2. Invernadero tipo sierra con ventilación cenital donde se realizó el experimento.

4.3 Sustrato

El sustrato que se usó en la unidad experimental fue una combinación de tezontle y fibra de coco con una relación (30%/ 70%), es un material procedente de la erupción de volcanes y está constituido por silicatos de aluminio, formado por fragmentos de lava porosa, redonda e irregular. Este material es uno de los sustratos más usados en México en los cultivos sin suelos, pero desafortunadamente es uno de los menos conocidos en cuanto a sus características físicas y químicas. La forma en que se ha venido usando es simplemente tamizándolo por una malla de $\frac{3}{4}$ a $\frac{1}{2}$ pulgada y todo lo que pase por ella se usa directamente en el llenado de las bolsas, sin embargo, hay productores que se les ha recomendado, eliminar el material fino y dejar solo lo grueso o viceversa, lo que en algunos casos los ha llevado a graves problemas ya sea por falta o exceso de agua y esto los ha llevado a no querer usar este

material por malas experiencias. Se ha demostrado que los tezontles más ligeros con muchos poros son los que mejor características presentan además de que facilitan su manejo en invernadero.

El tezontle es un excelente material, su principal inconveniente es su variabilidad, sin embargo, este problema se resuelve usando la mezcla granulométrica más adecuada, mediante el uso de tamices en el banco de material.

4.4 Sistema de cultivo

El cultivo que se estableció fue un sistema hidropónico, y se usaron como contenedores macetas (figura 4.3) de bolsa de color blanco de 40 x 40 cm.



Fig. 4.3. Cultivo de jitomate en sustrato

4.5 Medición de variables

El manejo de invernaderos requiere de un flujo continuo de cantidades de datos de las mediciones de los fenómenos físicos, químicos y fisiológicos dentro del invernadero. Esto implica el uso de sensores con una salida de una señal eléctrica conectado a un sistema de adquisición de datos (Bakker *et al.*, 1995).

En la horticultura se usan sensores para medida en campo de: el clima en el interior en invernaderos, suministro de nutrientes y en sistemas de riego, en general los sensores pueden llegar a tener errores del orden de $\pm 5\%$ (Bakker *et al.*, 1995).

La posición de los sensores es muy importante, especialmente cuando se miden condiciones climáticas los gradientes verticales y horizontales son intrínsecos a todas las variables climáticas dentro y fuera del invernadero. El clima de invernadero se caracteriza por temperaturas moderadas, muy alta humedad, intensa radiación solar, y pequeño movimiento del aire, esto complica la medida de la temperatura y de la humedad (Bakker *et al.*, 1995).

4.5.1 Sensores de temperatura y humedad del aire

En invernaderos se usan los sensores de temperatura de tipo resistivo, los hay de platino y de cerámica estándar NTC (termistores), en la medición de la temperatura del aire el error que se puede tener es del orden de $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Para resistores de platinos el error es mucho más pequeño (Bakker *et al.*, 1995).

Los sensores capacitivos para humedad del aire son lo que rempazan a los instrumentos de bulbo seco y húmedo y que pueden llegar a tener la misma

precisión y no necesitan mantenimiento durante la duración de un ciclo de cultivo hasta 6 o 9 meses. Después de ese periodo se debe hacer una calibración.

Se instaló una estación meteorológica en el interior del invernadero marca Campbell Scientific (Campbell Scientific, INC. USA). La temperatura y la humedad relativa se midieron con un sensor HMP50 (figura 4.4), colocado dentro de un tubo de PVC para evitar el contacto directo con la radiación solar, en un extremo del tubo se colocó un ventilador para evacuar el aire que pudiera quedar atrapado dentro del mismo. El sensor trabaja con un rango de medida de - 40 a 60 °C para la temperatura. Para el caso de la humedad relativa tiene un rango de medida es de 0-98 %, con precisión de ± 3 para rangos de (0-90 %), y ± 5 para lecturas de (90-98 %).



Fig. 4.4. Sensor de temperatura y humedad relativa HMP50 y detalle de la instalación.

4.5.2 Sensores de velocidad de viento

La velocidad del viento se mide con unos instrumentos denominados anemómetros, muchos de estos muestran un error que no es lineal a bajas velocidades y valores umbrales debido a la fricción cercano a la velocidad cero. Este no es un problema para señales de velocidad de viento que es usado para control climático, si se considera a la velocidad del viento como una variable de entrada, este podría causar problemas considerables e inadmisibles (Bakker *et al.*, 1995). Por lo que se usan sensores de velocidad del viento altamente sensibles ya que la velocidad del viento dentro de los invernaderos es muy baja.

Para medir la velocidad del viento en el invernadero se instaló un anemómetro ultrasónico 2-D (Windsonic1), de la marca Gill instruments distribuido por Campbell Scientific (Figura 4.5). Permite medir la velocidad del viento y su dirección, es una buena alternativa que sustituyen los anemómetros de tasa, de paletas y los mecánicos, a diferencia de los anemómetros mecánicos no tiene partes móviles que sean reemplazables periódicamente reduciendo costos de mantenimiento, la señal de salida del sensor es RS-232 que pueda ser leído en un datalogger.

Este sensor detecta velocidades mínimas de 0.01 ms^{-1} , mide la velocidad en el rango de 0 a 60 m s^{-1} con precisión de $\pm 2\%$ en la lectura con resolución de 0.01 m s^{-1} . Para el caso de la dirección el sensor mide en el rango de 0 - 360° , con una precisión de $\pm 3^\circ$ y una resolución de 1° . El sensor opera en rangos de humedad relativa de 0 - 100%, y a temperaturas de $-35 - 70^\circ \text{ C}$ con

un voltaje de entrada de 9 - 30 volts en corriente directa. Para evitar posibles errores el sensor se orientó hacia la dirección norte con ayuda de una brújula.



Fig.4.5. Sensor de velocidad del viento

4.5.3 Sensores de radiación

Las plantas utilizan la radiación entre 400 – 700 nm para la fotosíntesis (PAR), ya que el proceso se conduce por la absorción de fotones específicos en lugar de la energía completa.

La radiación solar para esta investigación se midió con un piranómetro modelo CMP3-L de Kipp & Zone (Figura 4.6), el cual mide la radiación solar con alta precisión, está equipado con una termopila negrecida protegida por una cúpula. La termopila negrecida provee una respuesta espectral plana a espectro completo de radiación. Esto permite el uso de CMP3-L bajo el follaje del cultivo, con lámparas, cuando está nublado y para la medición de la radiación reflejada. El CMP3-L produce una señal en milivoltio que es medida directamente por el datalogger.

El CMP3-L incluye una burbuja y tres tronillos niveladores de ajuste que permite que el sensor sea nivelado sin necesidad de una base niveladora, cuenta con un soporte de montaje.

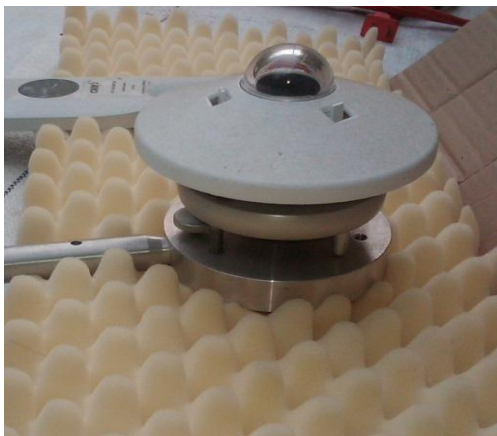


Fig. 4.6. Piranómetro modelo CMP3-L

4.5.4 Adquisición de datos

La estación meteorológica que se instaló en el interior del invernadero fue de la marca Campbell Scientific (Campbell Scientific, INC. USA), compuesta de un datalogger modelo CR1000 y en cada uno de los sensores antes mencionados, todos los sensores (el de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento y radiación) se colocaron en un mástil.

Las lecturas de los sensores se realizaron cada seis segundos, se promediaron y almacenaron en el datalogger (Figura 4.7) cada minuto. Las variables que se registraron, fueron la radiación solar, humedad relativa, temperatura del aire a 2 m, y velocidad del viento a 2.5 m. Se almacenaron 49 días de datos distribuidos en 4 bloques a lo largo del ciclo de cultivo, cada bloque presenta diferentes números de días.



Fig. 4.7. Sistema de adquisición de datos y medición de variables climáticas

4.6 Determinación de la tasa de transpiración

El método para determinar la transpiración E [$\text{kg m}^{-2} \text{min}^{-1}$] consistió en usar una balanza electrónica de acuerdo a la metodología propuesta en la literatura (Sánchez *et al.*, 2008; Medrano, 1999). La balanza se instaló al centro del invernadero sobre una de las líneas del cultivo.

El dispositivo consta de una balanza electrónica marca Sartorius modelo QA. con capacidad de 150 kg y una precisión de ± 2 g. Las plantas a muestrear se colocaron sobre una estructura diseñada para tal efecto de tal forma que estas se mantuvieran aisladas del tutoraje de las demás y así disminuir los posibles errores que se pudieran presentar (Figura 4.9). Sobre la misma se colocaron 8 plantas.

Las bolsas del sustrato se cubrieron con un plástico blanco para evitar la evaporación y de esta manera cuantificar únicamente el agua perdida correspondiente a la transpiración.

La estructura está compuesta por dos bandejas de acero galvanizado, una de ellas es sobre las que se colocaron las macetas y es por donde fluyen los lixiviados y por un extremo caen a una segunda bandeja (situada debajo de la primera) donde se almacenan por cerca de 3 días, hasta que sean desfogados desde una llave de paso situada en la parte inferior de la segunda bandeja (Figura 4.8).

Los datos de transpiración se registraron y almacenaron durante 49 días a lo largo del ciclo del cultivo y comprenden las fechas de (08/Julio/2011 al 31/Agosto/2011), estos datos se analizaron por bloques, teniéndose un total de cuatro bloques cada uno con diferentes números de días. En el bloque 1 se almacenaron 12 días de datos que van del 08 de julio al 19 de julio de 2011, el bloque 2 se almacenaron 10 días de datos comprenden los días de 24 de julio al 02 de agosto, el bloque 3 tiene 13 días y van del 04 de agosto al 16 de agosto de 2011 y el último bloque al final del ciclo de cultivo es el bloque 4 con 14 días de datos con fechas de 18 de agosto al 31 de agosto de 2011. En las Figuras del a) a la f) detallan los pasos para la instalación de la unidad experimental desde la colocación de la balanza, colocación de la estructura y la cubierta de plástico hasta la instrumentación.



Fig. 4.8. Pasos para la instalación de la balanza electrónica para medir la transpiración del cultivo.

La balanza- lisímetro se conectó a una PC para la adquisición de los datos. Las mediciones y el almacenamiento del peso de las plantas sobre la

balanza se realizó durante un ciclo completo del cultivo de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.), la transpiración se midió cada minuto.

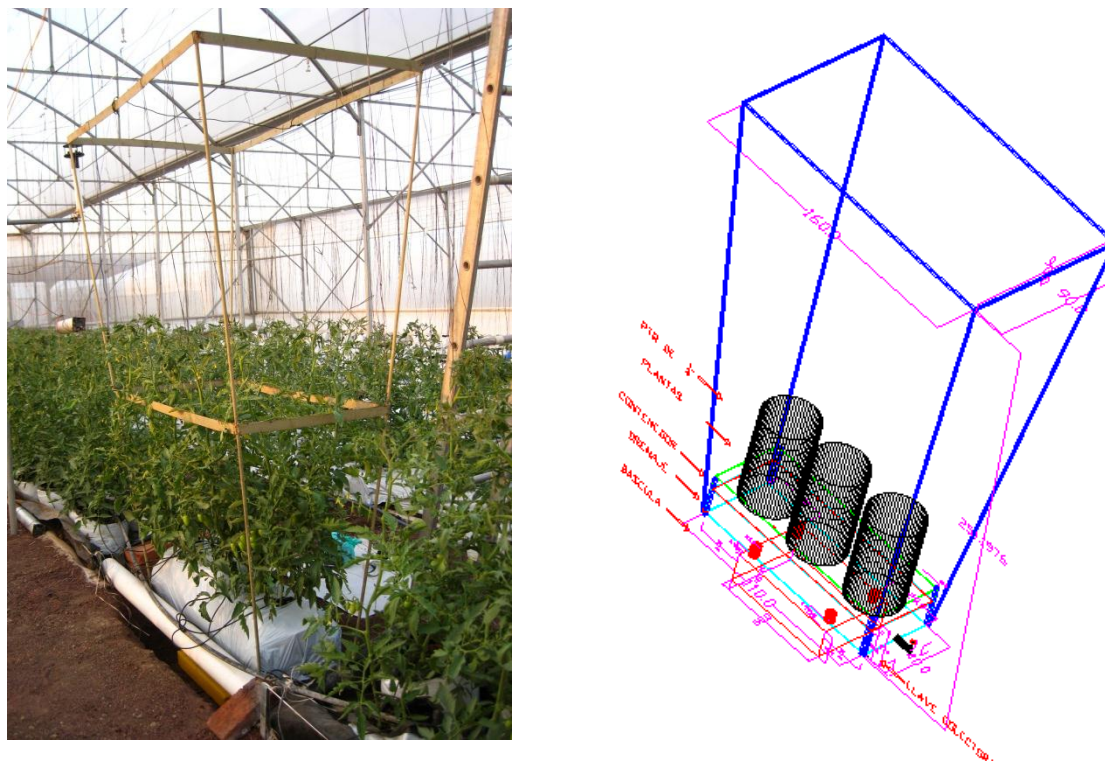


Fig.4.9. Estructura para la medición de la transpiración

4.7 Medición de Área foliar

El índice de área foliar tiene influencia en la interceptación de la radiación fotosintética, interceptación del agua, flujos de calor sensibles y latente y en el intercambio de CO_2 entre el ecosistema terrestre y la atmósfera, este valor se usa como una variable de estado importante en los modelos de simulación de crecimiento de cultivos (Liu y Pattey, 2010).

En este experimento este valor se obtuvo para cada 15 días aproximadamente, haciendo mediciones al inicio y fin de cada bloque de datos muestreados durante el ciclo de cultivo.

El área foliar se estimó mediante un método no destructivo. En un primer paso, se seleccionaron aleatoriamente tres plantas aleatoriamente en el invernadero, éstas se llevaron al laboratorio y se midió el largo y ancho de cada hoja con un flexómetro, y el área foliar correspondiente de cada hoja se le midió con un integrador de área foliar marca LI-COR modelo LI-3100 (Figura 4.10). Al elegir las plantas que se llevaron al laboratorio no se consideró las de la unidad experimental puesto que son el objeto de estudio. En un segundo paso, con la información de las dimensiones y área foliar de cada una de las hojas se buscó mediante ecuaciones de regresión lineal simple y múltiple, con el uso del programa Matlab, el mejor modelo que correlacionara las dimensiones (largo, ancho, largo x ancho, largo^2 , ancho^2) con el área foliar, y el mejor modelo obtenido se utilizó para determinar el área foliar de las plantas de la unidad experimental (cuadro 5.1). Las fechas para los que se determinaron esta variable fueron los siguientes; 7 y 20 de Julio de 2011; 3 y 17 de agosto de 2011, y 1 de septiembre de 2011. Con estos datos se realizó una interpolación lineal usando el ambiente de programación Matlab para obtener el área foliar cada 15 minutos para cada bloque de datos (cuadro 5.2).



Fig. 4.10. Determinación de área foliar (LI-COR modelo LI-3100) y medición de las dimensiones de las hojas.

4.8 Cálculo de la tasa de transpiración

Se parte de la hipótesis de que la pérdida de peso que registra la balanza entre dos tiempos es igual a la transpiración de las plantas colocadas sobre la estructura y para los casos donde se presentó un evento de riego se realizó su correspondiente filtrado de los datos, para estos casos se consideró el promedio de las diez medidas inmediatamente anteriores durante el tiempo que duró el riego. El peso medido en forma continua de la balanza se registró con un programa de adquisición de datos desarrollado en Lab View versión 9, donde se fijó el intervalo de tiempo entre dos registros de pesada sucesivos de un minuto, la tasa de transpiración expresada por m^2 de superficie [$\text{kg m}^{-2} \text{min}^{-1}$] se calculó a partir de los valores del peso bruto obtenidos de la balanza de la siguiente manera.

$$E = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{P_s(t) - P_s(t + \Delta t)}{S} \right) \quad (4.1)$$

Donde Δt es intervalo de tiempo (s), $P_s(t + \Delta t)$ y $P_s(t)$ representan los pesos (kg) registradas entre dos intervalos sucesivos de tiempo y S es la

superficie equivalente de invernadero (m^2) correspondiente a las plantas situadas sobre la balanza, que será la relación entre el número de plantas (n) = 8 plantas, situadas sobre la balanza y su densidad de siembra $D_s = 2.6$ en este caso el valor de $s = 3.0$.

4.9 Modelación de la tasa de transpiración

Existen dos enfoques generales para estimar la evapotranspiración indirectamente a partir ya sea de modelos empíricos o modelos teóricos usando datos meteorológicos. El enfoque empírico usa análisis de regresión para identificar correlaciones entre parámetros de entrada y tasa de transpiración. Las deficiencias de este enfoque es que las fórmulas empíricas desarrollados para una región específica durante un periodo específico puede no ser preciso para condiciones distintas (Prenger *et al.*, 2002). Estos modelos describen la relación entre variables, pero ofrecen poca o nula explicación de la relación causa efecto de los procesos del fenómeno. Por el contrario, un modelo mecanicista o basado en procesos, es aquel que se construye del conocimiento de los procesos físicos, químicos o biológicos que gobiernan el fenómeno bajo estudio. Estos modelos también son conocidos como modelos explicativos ya que estos representan la relación causa y efecto de las variables (Teh, 2006).

En el presente trabajo se usaron modelos usados por distintos autores alrededor del mundo para estimar la transpiración de jitomate: Baille *et al.* (1994), Bontsema *et al.* (2007), Villarreal *et al.* (2012) y Wang y Boulard (2000). En donde las variaciones en cada uno de ellos es la manera en que se calcula la resistencia estomática y aerodinámica todos los modelos están basados en la

ecuación para transpiración de Penman-Monteith (Goudriaan y van Laar, 1994; Monteith y Unsworth, 2008) .

4.9.1 Modelo de Baille

Esta ecuación cuando se aplica a cultivos en invernadero (Medrano, 2005; Baille *et al.*, 1994; Sánchez *et al.*, 2008; Joliet y Bailey 1992), se describe como se muestra en la ecuación (2.16) y (2.17). El objetivo de la calibración es encontrar el valor de los parámetros que intervienen en el modelo que corresponde al coeficiente radiativo (coef. A) y otro al coeficiente aerodinámico (déficit de presión de vapor), este último se pueden obtener un valor para el día y otro para la noche cuando la radiación es cero (coef. Bd y Coef Bn). Para este modelo los valores de radiación global (R_g) y déficit de presión de vapor (D) son variables de entrada, la primera se mide directamente con un sensor de radiación (Figura 4.6) y el déficit de presión de vapor se obtiene a partir de la ecuación (2.28) y (2.29) donde temperatura y la humedad relativa son variables medidas por el sensor de la (Figura 4.4), el índice de área foliar usados en los modelos fueron los que resultaron de la interpolación. Los valores de la transpiración calculadas con el modelo se expresan en $[W\ m^{-2}]$ y mediante conversión de unidades se presentan en el presente trabajo en $[g\ m^{-2}\ 15\ min^{-1}]$.

4.9.2 Modelo de Penman-Monteith

Otro de los modelos calibrados en este trabajo es el de Penman-Monteith ecuación (2.9) calculando las resistencias estomáticas y aerodinámicas conforme a las expresiones que se presenta en Wang y Boulard, (2000). Estas se describen en las ecuaciones (2.22) y (2.26) respectivamente, donde la

resistencia estomática considerando la expresión desarrollada por Jarvi's, Demrati *et al.* (2007). La resistencia estomática se calcula en función de la radiación solar y el déficit de presión de vapor, ambas variables calculadas de la misma manera que en el modelo anterior. Los coeficientes que se calibraron en este modelo para la resistencia estomática fueron c_1 , c_2 , c_3 (término de radiación) c_4 , c_5 , c_6 , c_7 (término aerodinámico) ambos descritos en la ecuación (2.22) y c_8 correspondiente a la ecuación (2.26) para a resistencia aerodinámica. En este caso la velocidad de viento es una variable de entrada medida con el sensor de la figura (4.5). La dimensión característica se calculó usando la ecuación (2.27) donde los valores de las dimensiones del largo y ancho fueron los que se usaron en los modelos de regresión del índice de área foliar, la radiación neta se obtuvo con la ecuación (2.19). En la ecuación (2.9) se presentan los detalles de las demás variables que intervienen en el modelo. Es importante mencionar que la constante psicrométrica se calculó para 2240 m de altitud del lugar donde se llevó a cabo la investigación. También se calibró la ecuación de la resistencia estomática ecuación (2.22) omitiendo el término aerodinámico (D).

4.9.3 Modelo de Stanghellini

En este trabajo se calibró también el modelo de Stanghellini expresado de 2 maneras una como lo sugiere la ecuación (2.12) usada por Bontsema *et al.* (2007) y la otra es la ecuación (2.9) usada por Villarreal *et al.* (2012). En el primer caso el término aerodinámico del modelo se expresa como la diferencia de las concentraciones de humedad ecuación (2.15), y la relación entre el calor

latente y el calor sensible se calcula con la ecuación (2.13) las demás variables ya han sido explicada la forma de determinarlos. Para este modelo la resistencia estomática se determinó con la ecuación (2.23) que proviene de la ecuación de Jarvi's (Demrati *et al.* 2007) donde considera una función de la radiación y otra de temperatura, los coeficientes calibrados fueron c_1 , c_2 , c_3 para el término radiativo, c_4 para el término de temperatura, y la resistencia aerodinámica (r_b).

Villarreal *et al.* (2012) retoma de la expresión de Jarvi's considerando la función de radiación y déficit de presión de vapor, ecuación (2.24), presentando una ecuación un tanto distinta a la que presenta Wang y Boulard (2000). En este caso los coeficientes calibrados fueron c_1 , c_2 , c_4 para el término de radiación y c_4 para el término correspondiente al déficit de presión de vapor. Además se calibró la resistencia aerodinámica (r_b).

4.10 Procedimiento de calibración

La calibración del modelo de transpiración de Baille consistió en plantear y resolver un problema de optimización para estimar los valores de los parámetros radiativo (A) y aerodinámico (B) que permitieran aproximar lo más posible las predicciones del modelo (y_{est}) a las mediciones (y_{obs}). La función a minimizar fue definida como sigue:

Minimizar

$$f(p) = \sum_{i=1}^N (Y_{i,est} - Y_{i,obs})^2 \quad (4.2)$$

Donde p es un vector que contiene los parámetros a estimar y N es el número de mediciones de la transpiración. El problema de optimización se resolvió numéricamente usando el procedimiento de mínimos cuadrados no lineales, el cual se encuentra implementado en la rutina `lsqnonlin` del Optimization toolbox de Matlab. El procedimiento de mínimos cuadrados utiliza el algoritmo de Levenberg-Marquardt para minimizar la función (4.2).

Solo requiere que el usuario defina un vector diferencia entre las estimaciones y las mediciones de la variable de interés.

4.11 Medidas estadísticas para evaluar el desempeño de los modelos en calibración y validación.

Para evaluar el desempeño que se obtuvo en la calibración y validación de cada uno de los modelos a continuación se mencionan cada uno de los parámetros de ajuste utilizados, el primero de ellos es el coeficiente de determinación (r^2) que indica el nivel de correlación que existe entre dos variables, la suma del cuadrado de los errores (MSE), la raíz de cuadrado medio de los errores (RMSE), el índice de ajuste, además se presenta la gráfica 1:1 para visualizar la capacidad de predicción de los modelos. También se presenta un análisis de varianza para cada bloque de datos analizados en la validación, con la finalidad de determinar la existencia de diferencias mínimas significativas entre las predicciones de cada uno de los modelos. Las correspondientes expresiones matemáticas de cada uno de estos índices de ajuste se presentan en las ecuaciones 2.35 - 2.38.

Capítulo 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el cuadro 5.1 se presentan los modelos encontrados al relacionar las dimensiones de las hojas y el area foliar y con estos modelos se determinó el area foliar de la unidad experimental.

Cuadro 5.1. Modelos utilizados para determinar el área foliar de la unidad experimental.

07 de Julio de 2012					
VARIABLE	MODELO	PARÁMETROS	IC	R ²	RMSE
Largo X Ancho	$A_f = \alpha(La)^b$	$\alpha = 0.2147$	(0.09583, 0.3335)	0.9731	22.80
		$b = 1.024$	(0.9469, 1.102)		
20 de Julio de 2012					
Ancho	$A_f = \alpha A^b$	$\alpha = 1.963$	(0.2805, 3.646)	0.8406	69.67
		$b = 1.475$	(1.243, 1.707)		
03 de Agosto de 2012					
Ancho ²	$A_f = p1*(A^2)^2 + p2*(A^2) + p3$	$p1 = -3.407e-5$	(-5.045e-5, -1.77e-5)	0.9357	78.82
		$p2 = 0.393$	(0.34, 0.446)		
		$p3 = -1.32$	(-40.1, 37.46)		
17 de Agosto de 2012					
Largo X Ancho	$A_f = \alpha(La)^b$	$\alpha = 0.06997$	(0.02616, 0.1138)	0.9664	0.966
		$b = 1.187$	(1.103, 1.271)		
01 de Septiembre de 2012					
Ancho ²	$A_f = p1*(A^2)^2 + p2*(A^2) + p3$	$p1 = -7.04e-5$	(-9.855e-5, -4.22e-5)	0.9272	53.65
		$p2 = 0.4264$	(0.363, 0.4898)		
		$p3 = -14.02$	(-40.56, 12.52)		

IC = intervalo de confianza.

Cuadro 5.2. Valores de índices de área foliar para distintas fechas de muestreo, para un área de piso de la unidad experimental de 1.92 m².

Fechas		IAF [m ² m ⁻²]	hojas removidas [m ² m ⁻²]
IAF1	07 julio de 2011	3.01	2.30
IAF2	20 julio de 2011	3.02	
IAF3	03 agosto de 2011	3.00	
IAF4	17 agosto de 2011	2.67	1.84
IAF5	01 septiembre de 2011	2.32	

En la figura 5.1 se muestran las variables climáticas medidas dentro del invernadero, que requieren los diferentes modelos de transpiración. En la figura 5.2 se observa la transpiración medida dentro del invernadero con la balanza lisímetro. Las mediciones corresponden a los bloques de datos 3 y 5 que comprende 08 julio-19 julio de 2011 y 04 agosto-16 agosto de 2011, dando un total de 25 días datos.

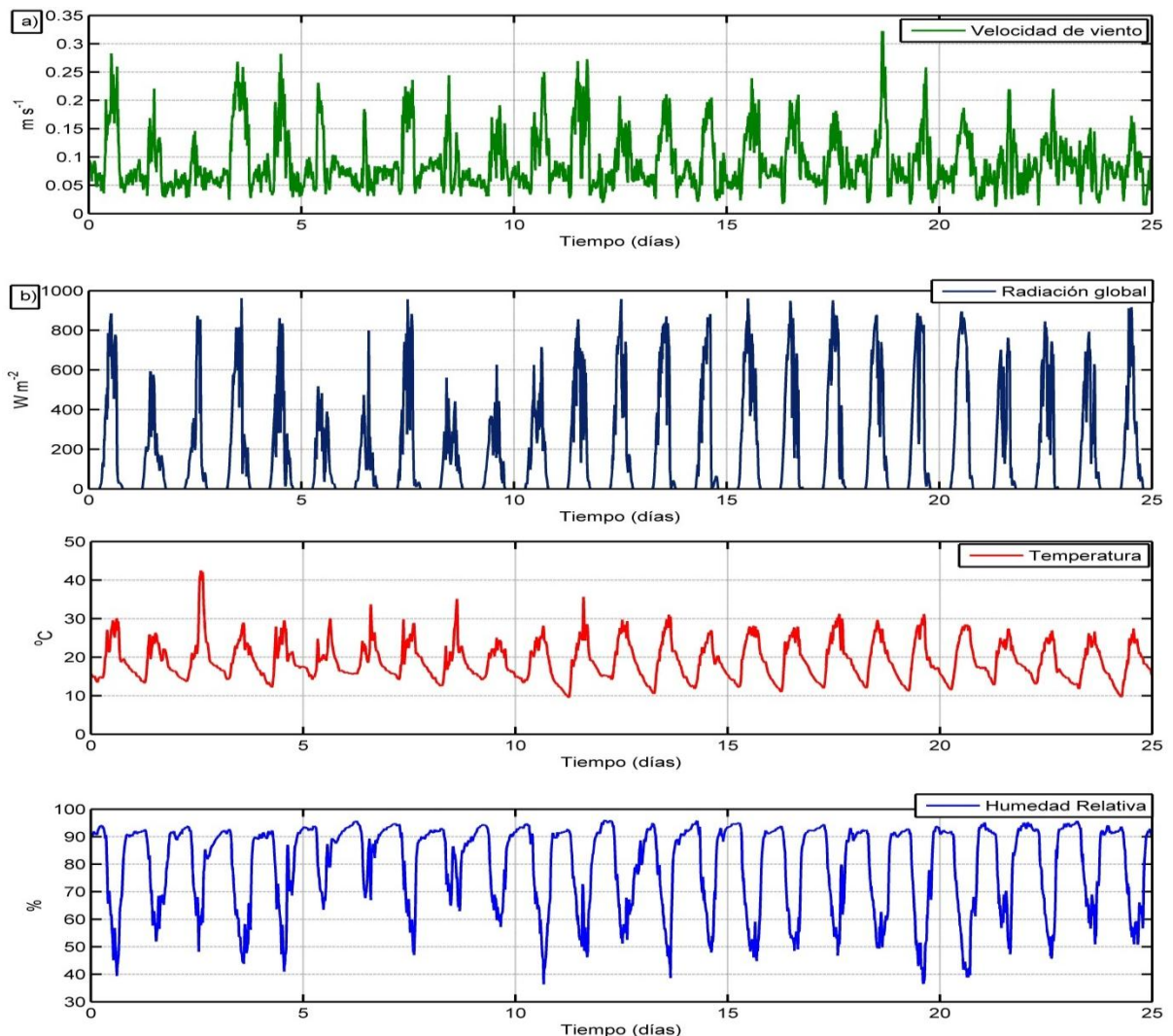


Fig. 5.1. Variables meteorológicas de 25 días medidas dentro del invernadero, en Chapingo, México. a) velocidad del viento, b) radiación solar global, c) temperatura, d) humedad relativa.

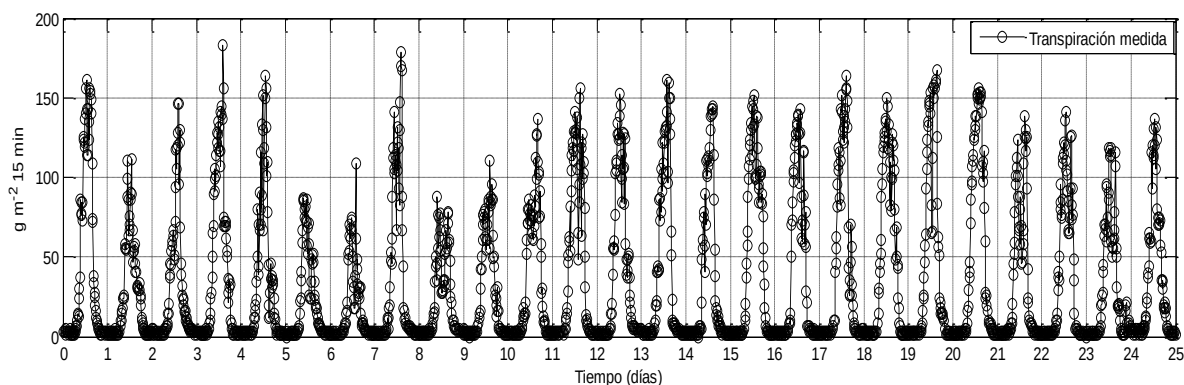


Fig.5.2. Transpiración de un cultivo de jitomate en invernadero durante 25 días medida en Chapingo, México.

Inicialmente se ejecutaron simulaciones de los modelos usando valores para los parámetros reportados en la diferente literatura. Sánchez *et al.* (2008), Wang y Boulard (2000), Villarreal *et al.* (2012), Bontsema *et al.* (2007), encontraron buenos resultados para un cultivo de jitomate en distintas partes del mundo. En las figuras 5.3 y 5.4 se presentan los datos de transpiración simulada usando los valores de los parámetros reportados en la literatura antes mencionada. Puede observarse que el ajuste de las predicciones con las mediciones de la transpiración en la mayoría de los modelos es pobre por lo que se justifica una calibración de los modelos.

Los resultados para cada modelo son los siguientes. Para el modelo de Baille , $RMSE = 10.728 \text{ g m}^{-2} 15\text{min}^{-1}$, $R^2 = 0.946$, índice de ajuste (id) = 0.984; para P-M Wang y Boulard un $RMSE = 40.099 \text{ g m}^{-2} 15\text{min}^{-1}$, $R^2 = 0.962$, id = 0.892; para Stanghellini Simplificado se tiene un $RMSE = 22.025 \text{ g m}^{-2} 15\text{min}^{-1}$, $R^2 = 0.968$, id = 0.91; para Stanghellini con resistencias de Villarreal se encontraron un $RMSE = 30.57 \text{ g m}^{-2} 15\text{min}^{-1}$, $R^2 = 0.869$, id = 0.92, los resultados no son muy buenos para la mayoría de los modelos.

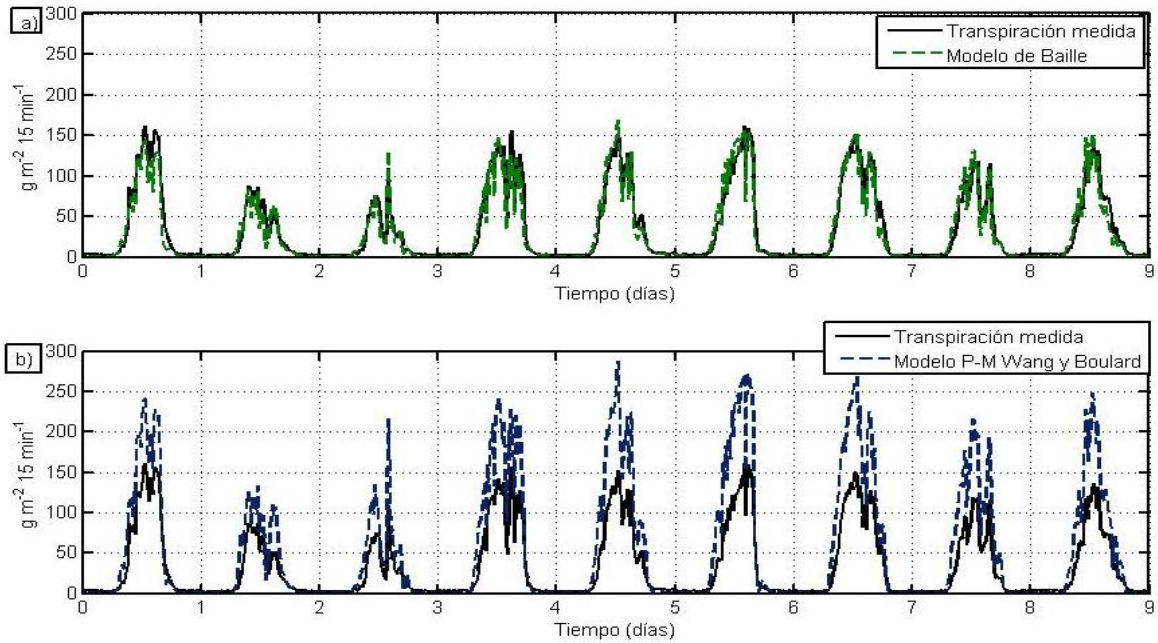


Fig. 5.3. Transpiración del cultivo estimado con los diferentes modelos sin calibrar para 9 días.

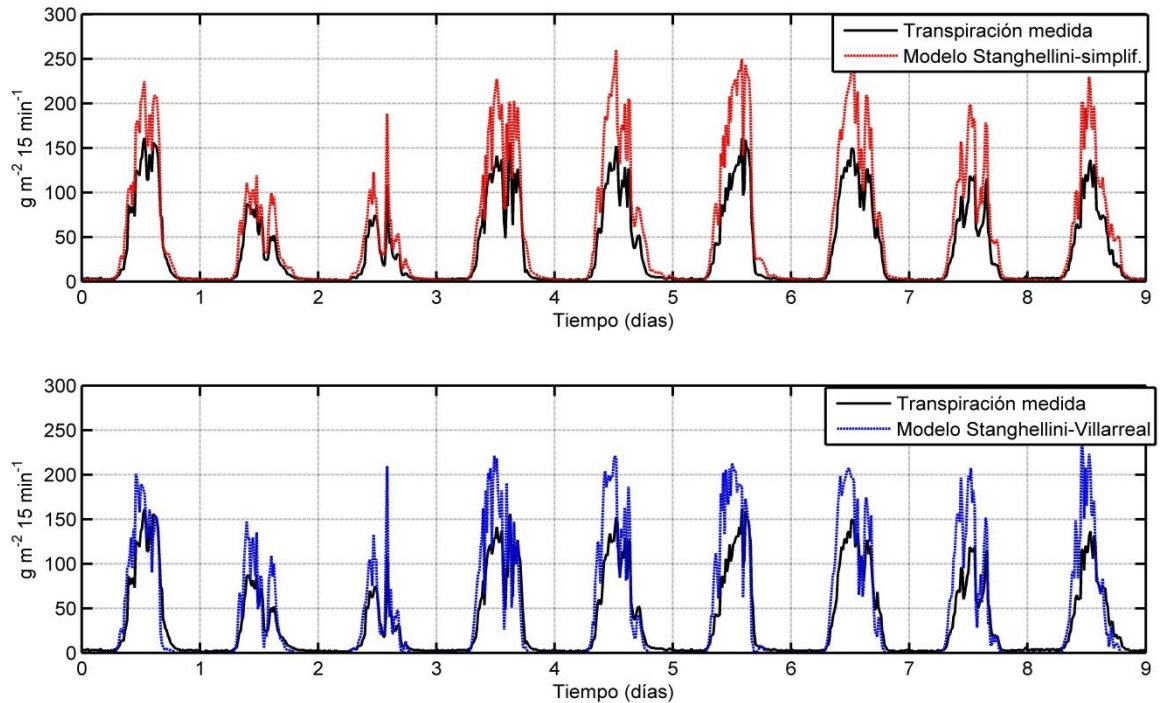


Fig. 5.4. Transpiración del cultivo estimado con los diferentes modelos sin calibrar para 9 días.

5.1 Calibración de los modelos para $IAF = 2.3 - 3.02 \text{ [m}^2 \text{ m}^{-2}\text{]}$.

Las figuras 5.5 y 5.6 muestran la simulación de la transpiración con los modelos de Baille, Penman - Monteith (con resistencias de Wang y Boulard) y Stanghellini (simplificado y con resistencias de Villarreal) para 9 días de mediciones del bloque 3 y 5, para índices de área foliar de 2.3 a 3.02 $[\text{m}^2 \text{ m}^{-2}]$. Puede observarse que mejoró la calidad de predicción de los modelos.

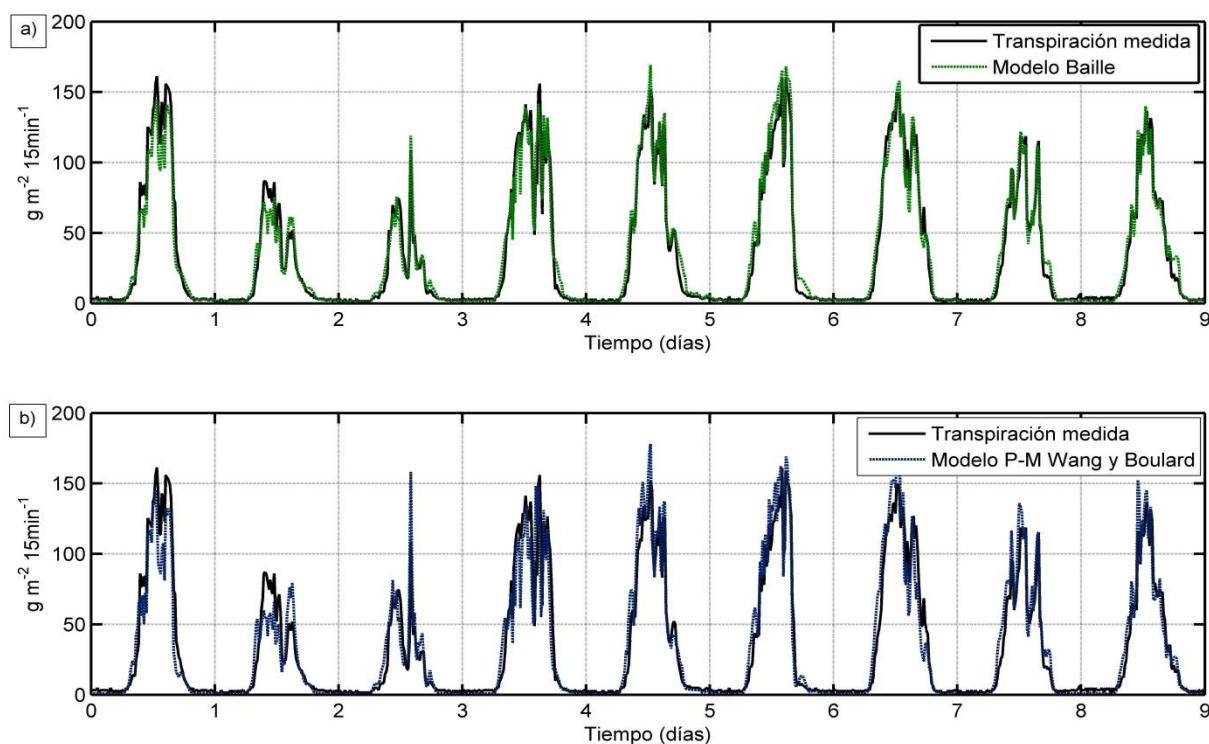


Fig. 5.5. Calibración de los modelos de transpiración de a) Baille y b) Penman-Monteith (resistencias de Wang y Boulard) de 9 días para IAF de 2.3 – 3.02 $[\text{m}^2 \text{ m}^{-2}]$.

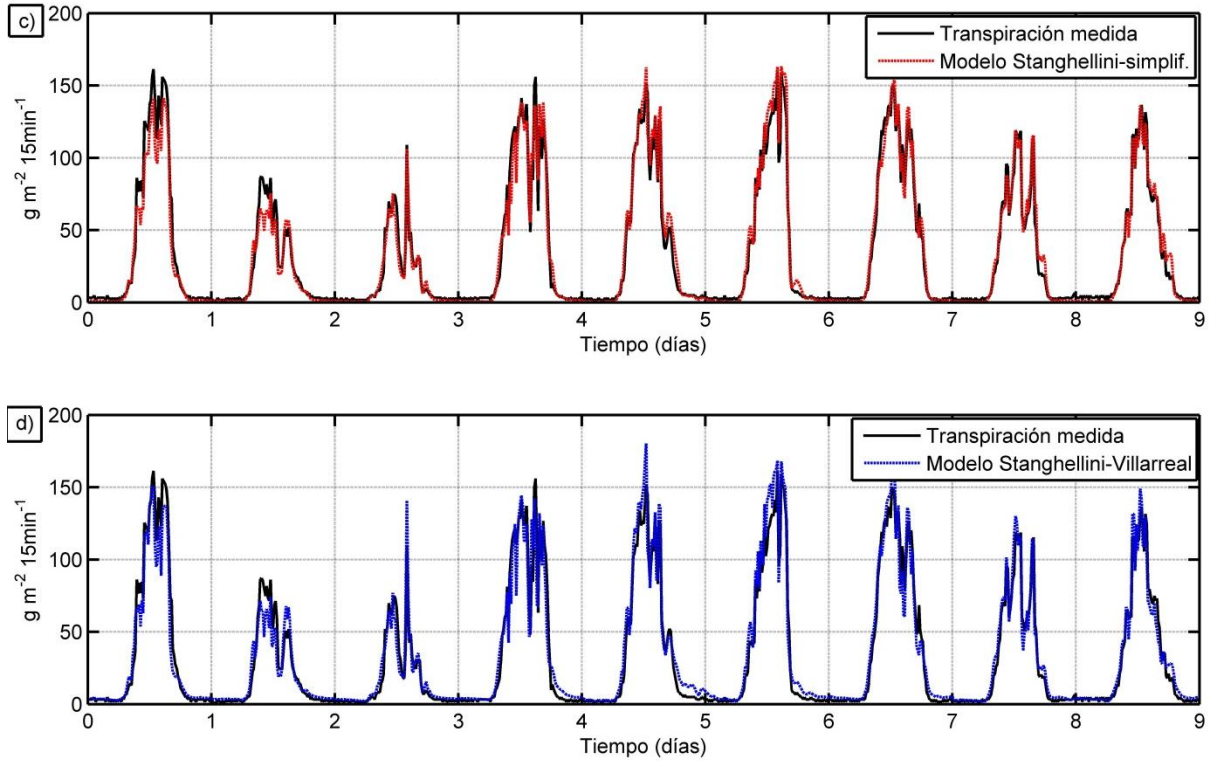


Fig. 5.6. Calibración del modelo de transpiración de c) Stanghellini-simplificado, d) Stanghellini usando las resistencias de Villarreal de 9 días para IAF de 2.3 – 3.02 [m² m⁻²].

5.2 Resultados de la calibración para IAF= 2.3 – 3.02 [m² m⁻²].

En los cuadros 5.3 al 5.7 se muestran los valores de los parámetros calibrados de cada uno de los modelos, los resultados de la regresión, y las distintas estadísticas de ajuste RMSE (raíz del cuadrado medio del error), MSE (suma del promedio de los errores) y el índice de ajuste del modelo, donde $c_1, c_2, \dots, c_n$ son los parámetros de los modelos y r_b es la resistencia aerodinámica.

Cuadro 5.3. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo de Baille.

PARÁMETROS		Y = a x + b					RMSE	MSE	Índice de ajuste
Coef.A	0.3293	A	b	R ²	a (IC)	b (IC)	8.0812	65.306	0.9914
Coef.Bd	30.551	0.9601	1.7263	0.9669	0.9482	1.0687			
Coef.Bn	14.989				0.9719	2.3839			

Cuadro 5.4. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo de Penman-Monteith (con resistencias de Wang y Boulard).

PARÁMETROS		Y = a x + b					RMSE	MSE	Índice de ajuste
c1	360.0743	A	b	R²	a (IC)	b (IC)	12.5245	156.86	0.980
c2	0.06503	0.974	0.687	0.9232	0.9553	-0.3537			
c3	5				0.9929	1.7290			
c4	0.06247								
c5	0.87327								
c6	188.068								
c7	39.82219								
rb	36.9177								

Cuadro 5.5. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo de Penman-Monteith (con resistencias de Wang y Boulard) sin DPV.

PARÁMETROS		Y = a x + b					RMSE	MSE	Índice de ajuste
c1	360.3188	A	b	R ²	a (IC)	b (IC)	12.524	156.864	0.980
c2	0.065145	0.9741	0.6860	0.9232	0.9553	-0.3553			
c3	5				0.9929	1.7274			
rb	36.95885								

Cuadro 5.6. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo de Stanghellini versión simplificada.

PARÁMETROS		Y = a x + b					RMSE	MSE	Índice de ajuste
c1	33.27896	A	b	R²	a (IC)	b (IC)	7.3947	54.682	0.9929
c2	40				0.9674	-0.6063			
c3	1.2503				0.9894	0.6124			
c4	0.00702								
rb	67.2393								

Cuadro 5.7. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo de Stanghellini con resistencias de Villarreal.

PARÁMETROS		$Y = a x + b$				RMSE	MSE	Índice de ajuste
c1	270.73168	A	b	R^2	a (IC)	9.1301	83.3596	0.9892
c2	23.27359				0.9502			
c3	24.04639				0.9771			
c4	2.04E-08							
rb	93.049156							

En la figura 5.7 se muestra los ajustes obtenidos de la calibración, entre la transpiración medida y la transpiración estimada por cada modelo, mediante una gráfica 1:1 y una ecuación de regresión lineal simple (línea roja) los parámetros de regresión se presentaron en los cuadros anteriores.

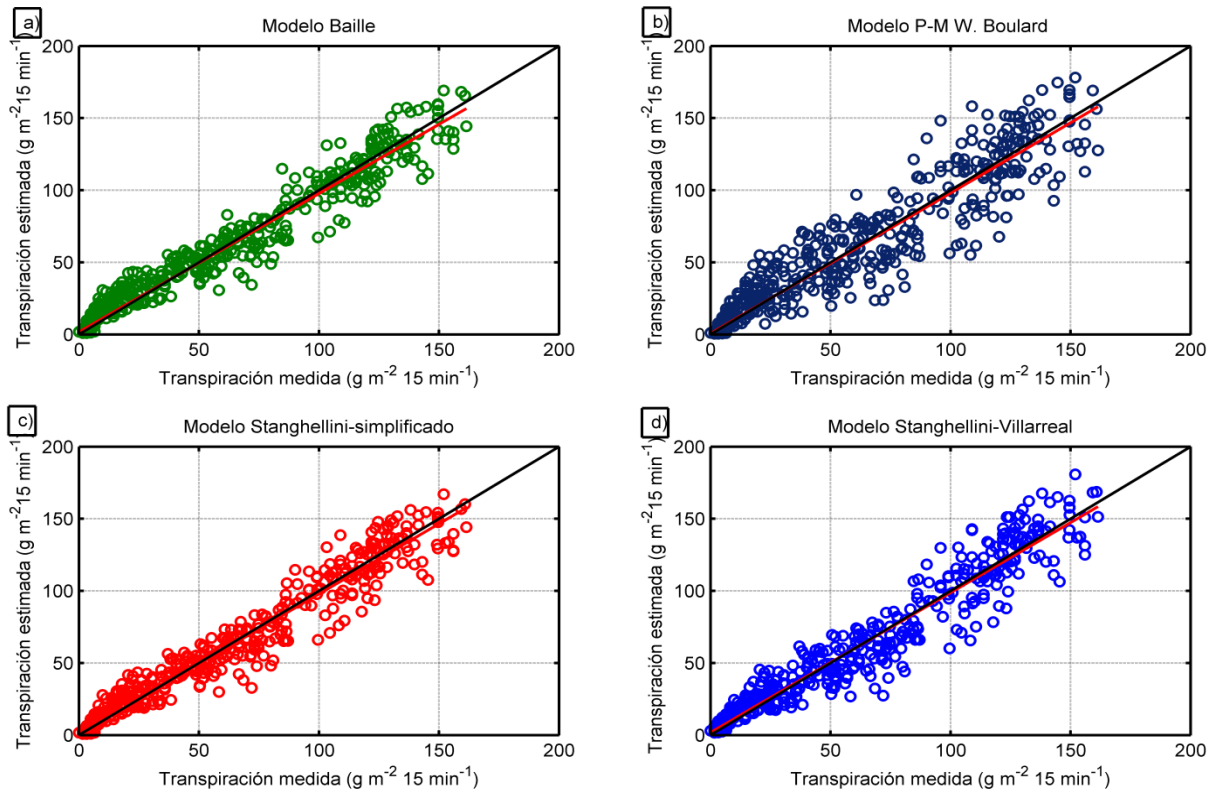


Fig. 5.7. Gráfica de regresión entre la transpiración medida y estimada por los diferentes modelos de transpiración y gráfica 1:1 para 9 días de calibración.

5.3 Validación de los modelos para $IAF = 2.3 - 3.02 \text{ [m}^2 \text{ m}^{-2}\text{]}$.

Para evaluar la calidad de predicción de los modelos, se usaron los datos de 16 días del bloque 3 y 5 y se ejecutó una simulación usando los resultados obtenidos en la calibración. Las figuras 5.8 y 5.9 muestran la comparación entre las predicciones de los modelos para índices de área foliar de $2.3 - 3.02 \text{ [m}^2 \text{ m}^{-2}\text{]}$. En las figuras 5.10 y 5.11 se muestran la transpiración calculada con cada uno de los modelos y la transpiración medida en el invernadero con el lisímetro para dos días, uno despejado y otro nublado.

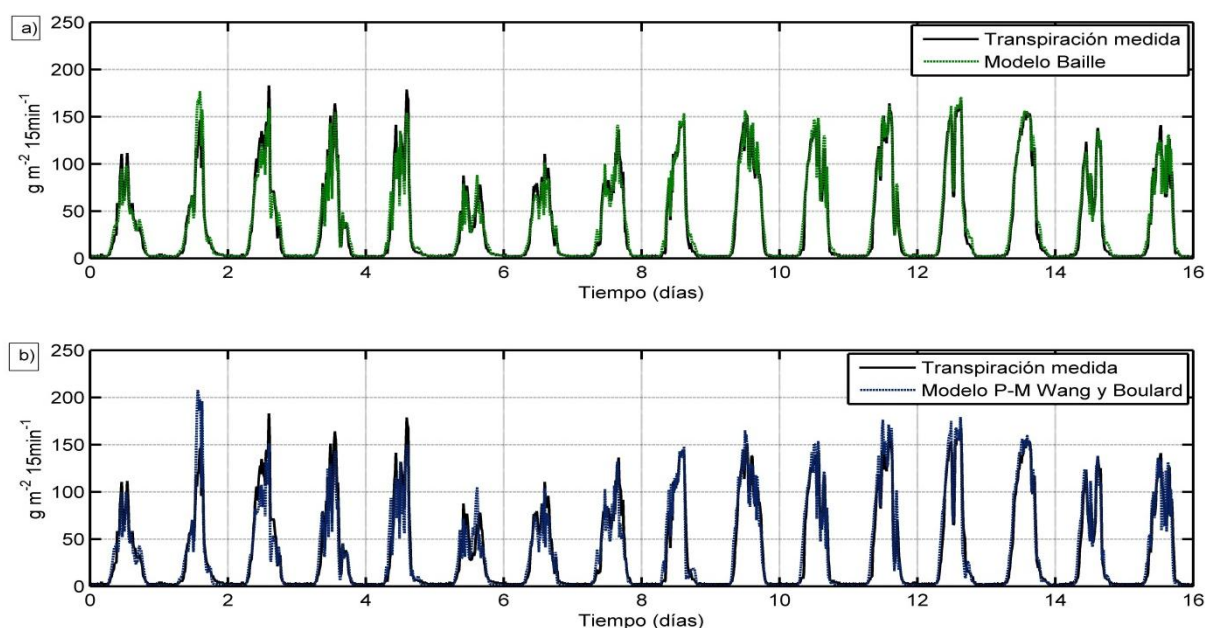


Fig. 5.8. Validación de los modelos de transpiración de a) Baille y b) Penman-Monteith (resistencias de Wang y Boulard) de 16 días para IAF de $2.3 - 3.02 \text{ [m}^2 \text{ m}^{-2}\text{]}$.

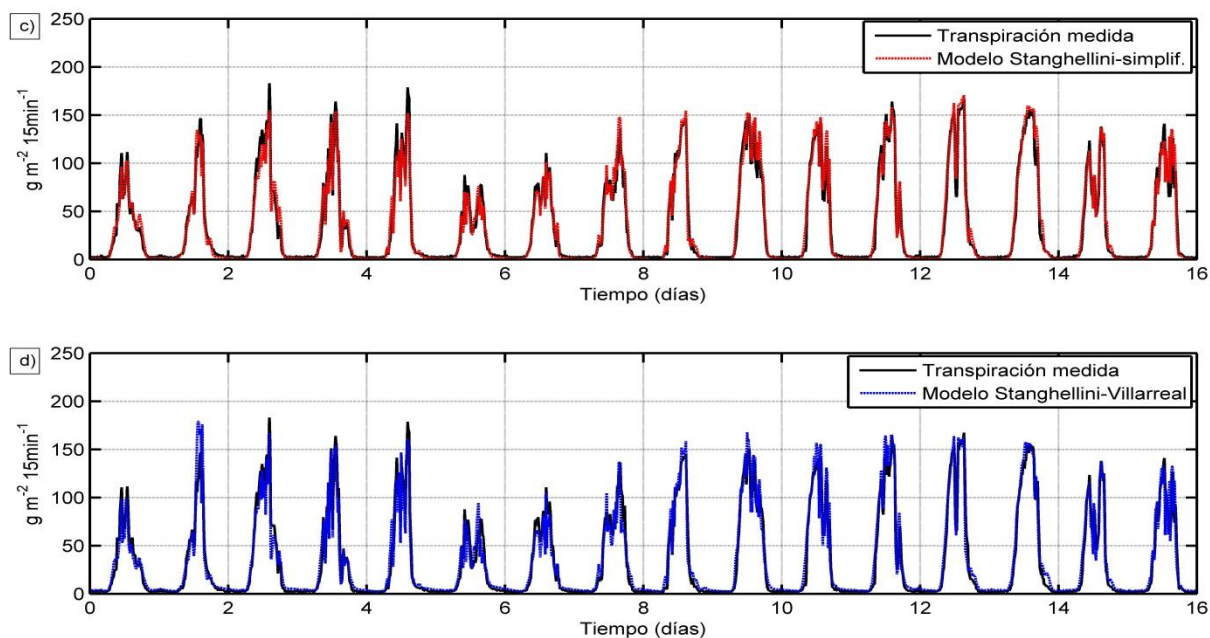


Fig. 5.9. Validación del modelo de transpiración de c) Stanghellini-simplificado y d) Stanghellini usando las resistencias de Villarreal de 16 días para IAF de 2.3 – 3.02 [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$].

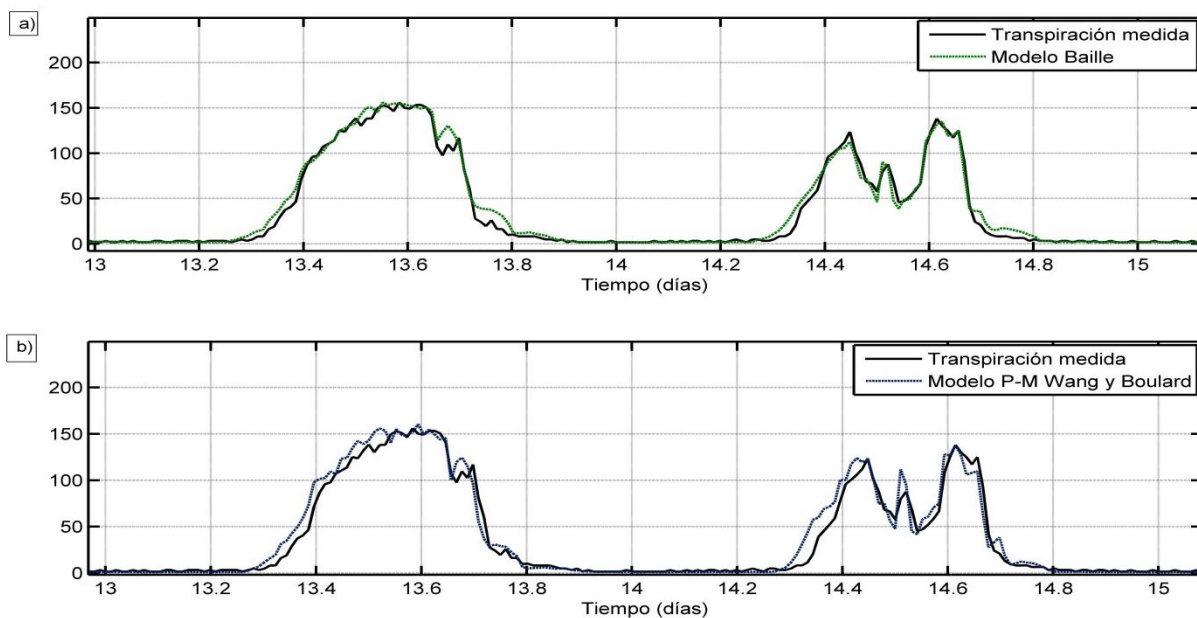


Fig. 5.10. Validación de los modelos de transpiración de a) Baille y b) Penman-Monteith (resistencias de Wang y Boulard) de los días 12 y 13 de agosto de 2011 para IAF de 2.3 – 3.02 [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$].

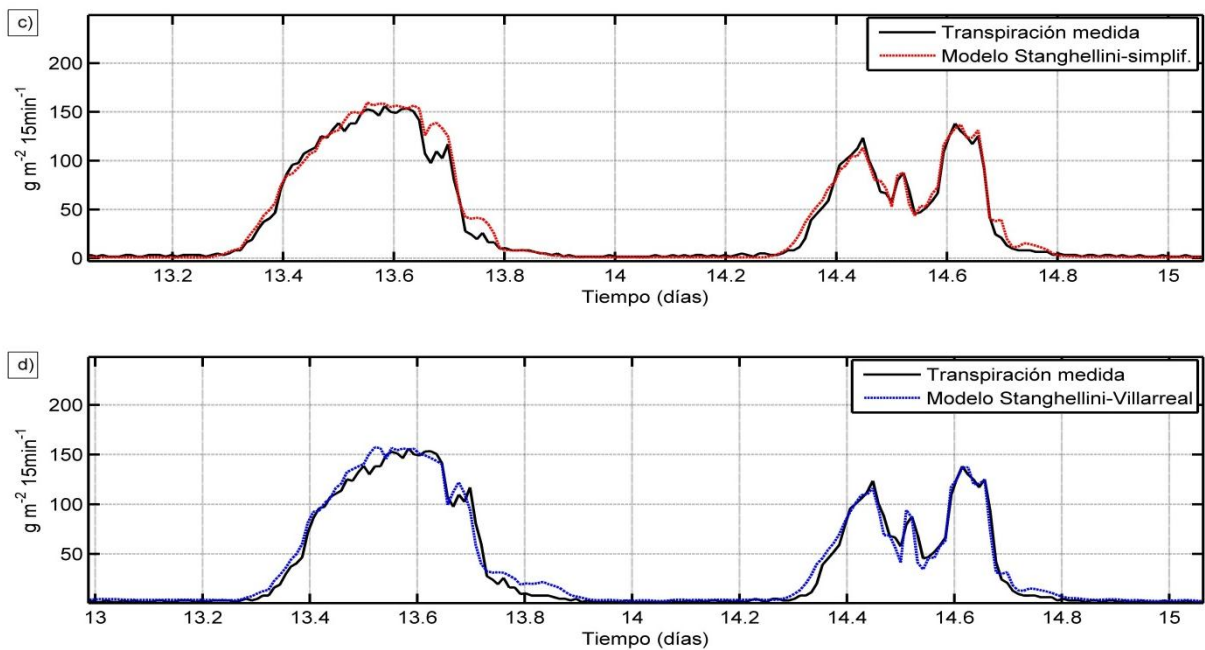


Fig. 5.11. Validación del modelo de transpiración de c) Stanghellini-simplificado d) Stanghellini con las resistencias de Villarreal para los días 12 y 13 de agosto de 2011 IAF de $2.3 - 3.02 [\text{m}^2 \text{m}^{-2}]$.

5.4 Resultados de la validación para IAF= $2.3 - 3.02 [\text{m}^2 \text{m}^{-2}]$.

En los cuadros 5.8 al 5.12 se muestran los valores de los parámetros de la validación de cada uno de los modelos, los resultados de la regresión, y las distintas estadísticas de ajuste RMSE (raíz del cuadrado medio del error), MSE (suma del promedio de los errores) y el índice de ajuste del modelo, donde $c_1, c_2, \dots, c_n$ son los parámetros de los modelos y r_b es la resistencia aerodinámica.

Cuadro 5.8. Parámetros estadísticos de la validación del modelo de Baille.

PARÁMETROS		Y = a x + b					RMSE	MSE	Índice de ajuste
Coef.A	0.3293	A	b	R ²	a (IC)	b (IC)	8.445	71.333	0.9912
Coef.Bd	30.5518	0.9712	1.7117	0.9661	0.9621	1.191			
Coef.Bn	14.9891				0.9803	2.233			

Cuadro 5.9. Parámetros estadísticos de la validación del modelo de Penman-Monteith (con resistencias de Wang y Boulard).

PARÁMETROS		Y = a x + b					RMSE	MSE	Índice de ajuste
c1	360.0744	A	b	R²	a (IC)	b (IC)	13.054	170.417	0.9796
c2	0.065031				0.9646	-0.3447			
c3	5				0.9931	1.2858			
c4	0.06247								
c5	0.87327								
c6	188.068								
c7	39.82219								
c8	36.9177								

Cuadro 5.10. Parámetros estadísticos de la validación del modelo de Penman-Monteith (con resistencias de Wang y Boulard) sin DPV.

PARÁMETROS		Y = a x + b					RMSE	MSE	Índice de ajuste
c1	360.3189	A	b	R ²	a (IC)	b (IC)	13.054	170.415	0.9796
c2	0.065145	0.978	0.468	0.9218	0.964	-0.346			
c3	5				0.993	1.2842			
c4	36.95885								

Cuadro 5.11. Parámetros estadísticos de la validación del modelo de Stanghellini versión simplificada.

PARÁMETROS		Y = a x + b					RMSE	MSE	Índice de ajuste
c1	33.27896	A	b	R²	a (IC)	b (IC)	7.868	61.913	0.9926
c2	40	0.9955	0.1742	0.9709	0.9868	-0.3184			
c3	1.2503				1.0041	0.6668			
c4	0.00702								
rb	67.2393								

Cuadro 5.12. Parámetros estadísticos de la validación del modelo de Stanghellini con resistencias de Villarreal.

PARÁMETROS		Y = a x + b					RMSE	MSE	Índice de ajuste
c1	270.73168	a	b	R²	a (IC)	b (IC)	9.5717	91.6176	0.9887428
c2	23.27359	0.964	2.1763	0.9566	0.9541	1.5885			
c3	24.04639				0.9747	2.7640			
c4	2.04E-08								
rb	93.049156								

En la figura 5.12 se muestran los ajustes obtenidos de la validación, entre la transpiración medida y la transpiración estimada por cada modelo, mediante una gráfica 1:1 y una ecuación de regresión lineal simple (línea roja), los parámetros de regresión se presentaron en los cuadros del 5.8 al 5.12.

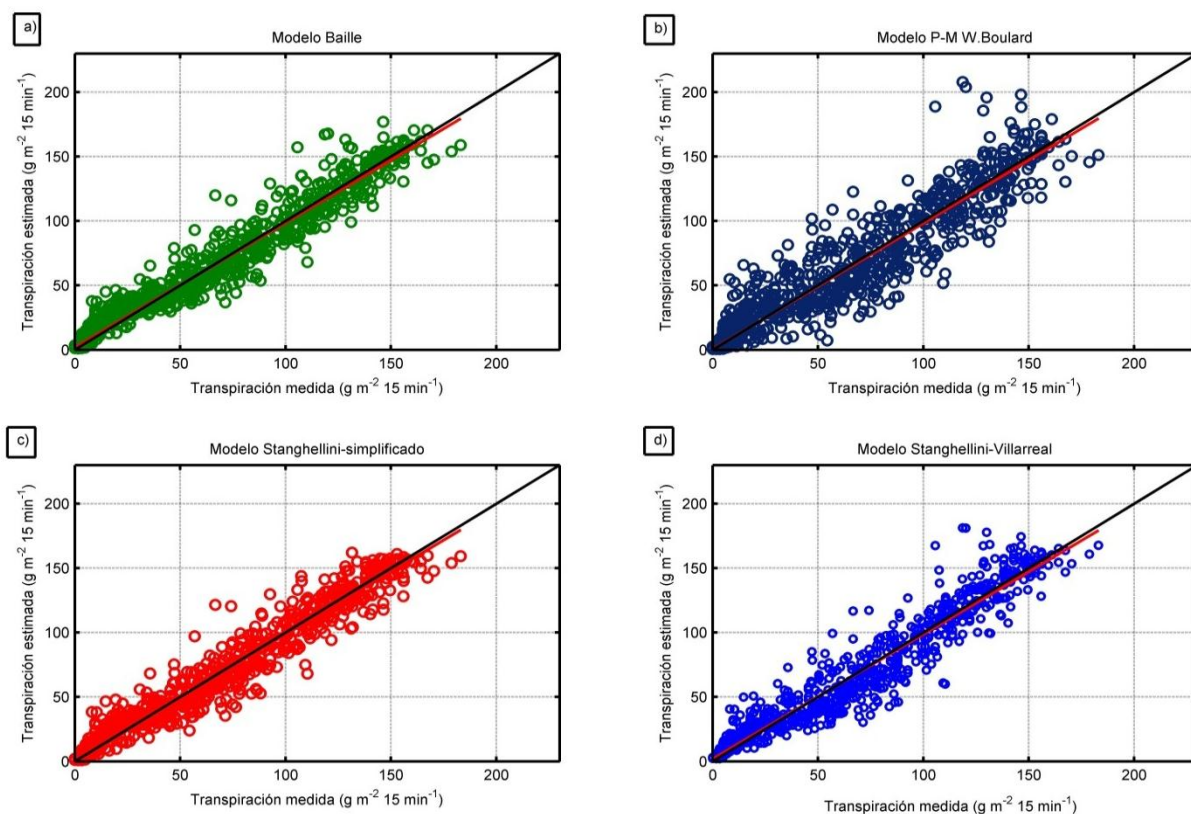


Fig. 5.12. Gráfica de regresión entre la transpiración medida y estimada por los diferentes modelos de transpiración y gráfica 1:1 para 16 días de validación.

En la figura 5.13 se muestra las variables climáticas medidas dentro del invernadero, que requieren los diferentes modelos de transpiración, la figura 5.14 contiene la transpiración medida dentro del invernadero con la balanza lisímetro. Las mediciones corresponden al bloque de datos 4 que comprende 24 Julio-02 Agosto de 2011 para 10 días.

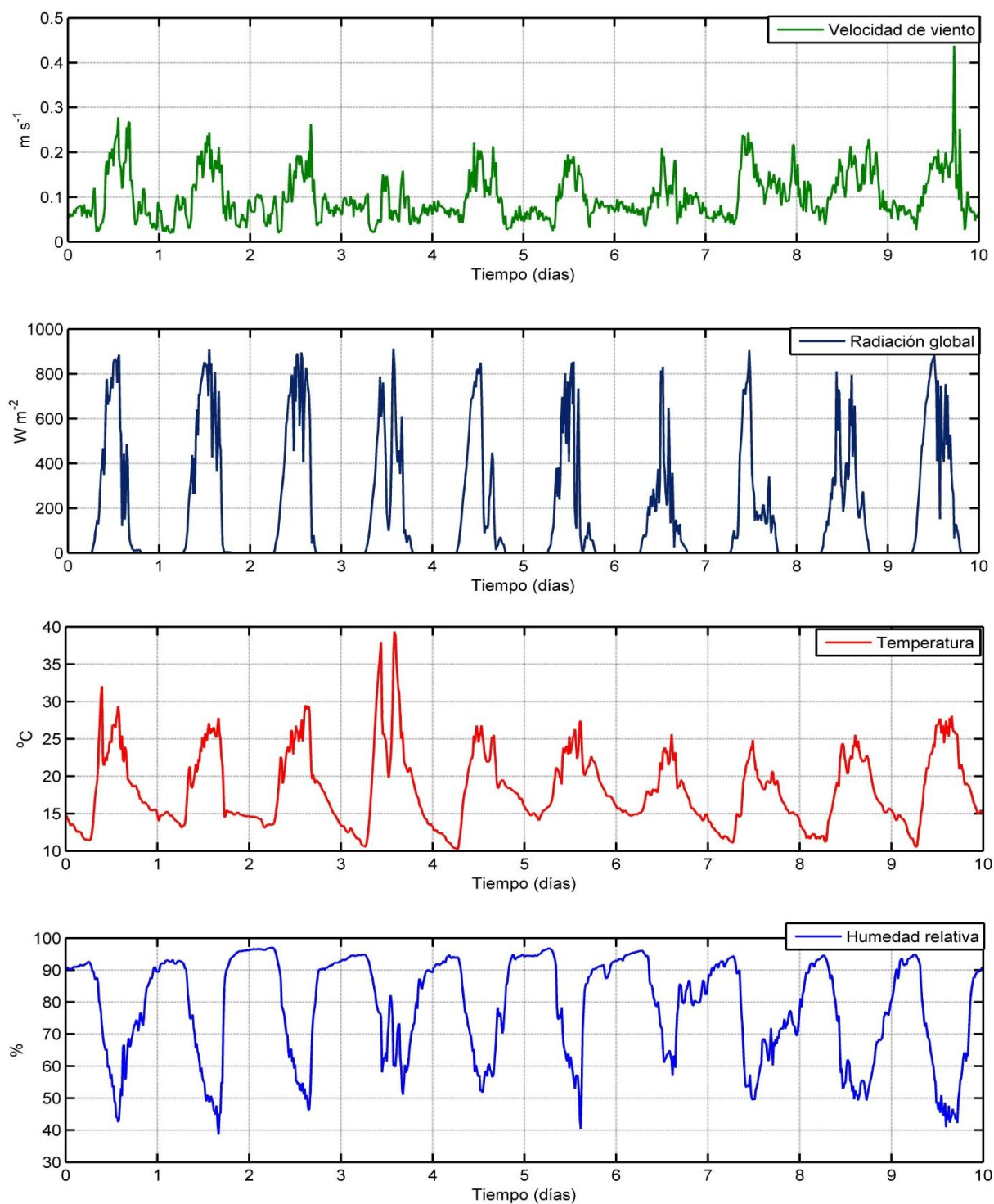


Fig. 5.13. Variables meteorológicas de 10 días medidas dentro del invernadero, en Chapingo, México. a) velocidad del viento, b) radiación solar global, c) temperatura, d) humedad relativa.

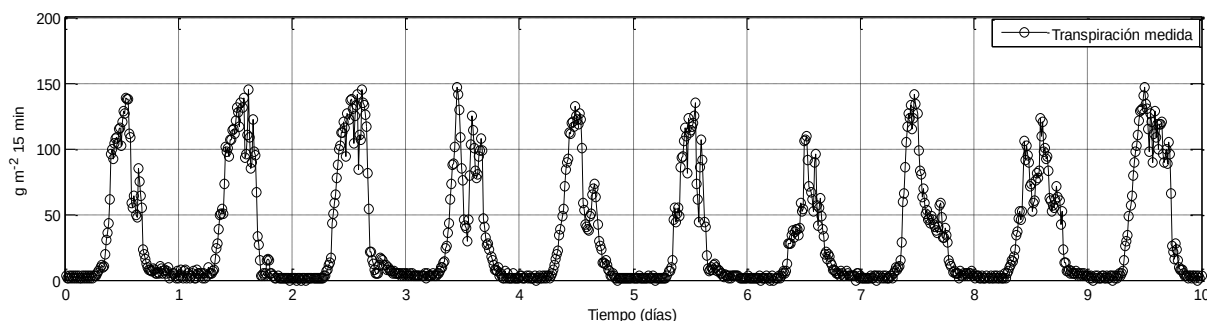


Fig. 5.14. Transpiración de un cultivo de jitomate en invernadero durante 10 días medida en Chapingo, México.

5.5 Calibración de los modelos para $IAF = 3.0 - 3.02 \text{ [m}^2 \text{ m}^{-2}\text{]}$.

Las figuras 5.15 y 5.16 muestran la simulación de la transpiración mediante los modelos de Baille, Penman-Monteith con resistencias de Wang y Boulard y Stanghellini simplificado y con resistencias de Villarreal para 4 días de mediciones del bloque 4, para índices de área foliar de 3.0 a 3.02 $\text{[m}^2 \text{ m}^{-2}\text{]}$. Puede observarse que la calidad de predicción de los modelos es aceptable.

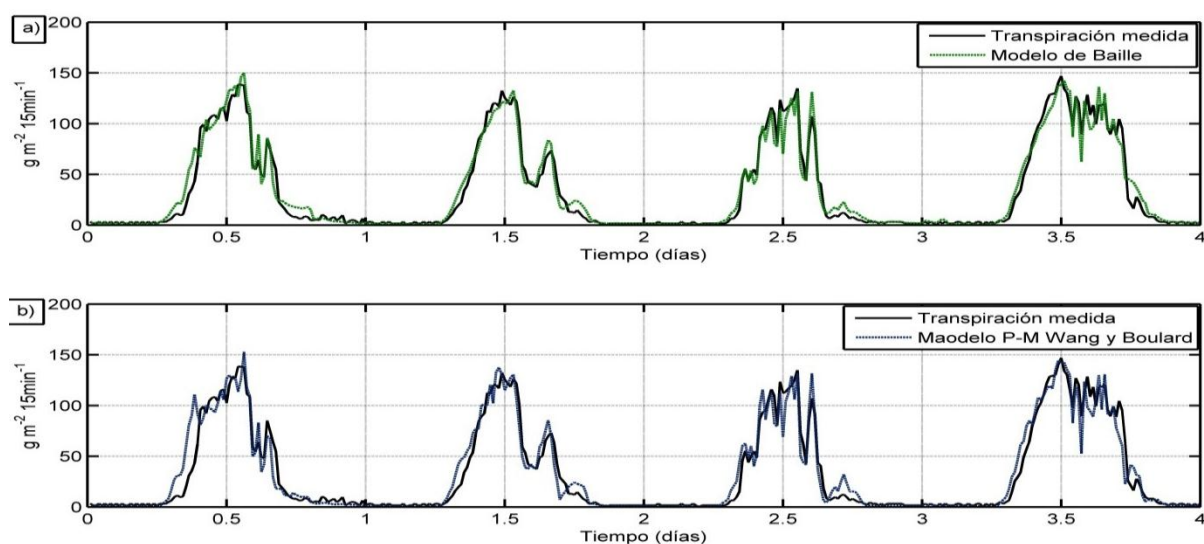


Fig. 5.15. Calibración de los modelos de transpiración de a) Baille y b) Penman-Monteith (resistencias de Wang y Boulard) de 4 días para IAF de 3.00 – 3.02 $\text{[m}^2 \text{ m}^{-2}\text{]}$.

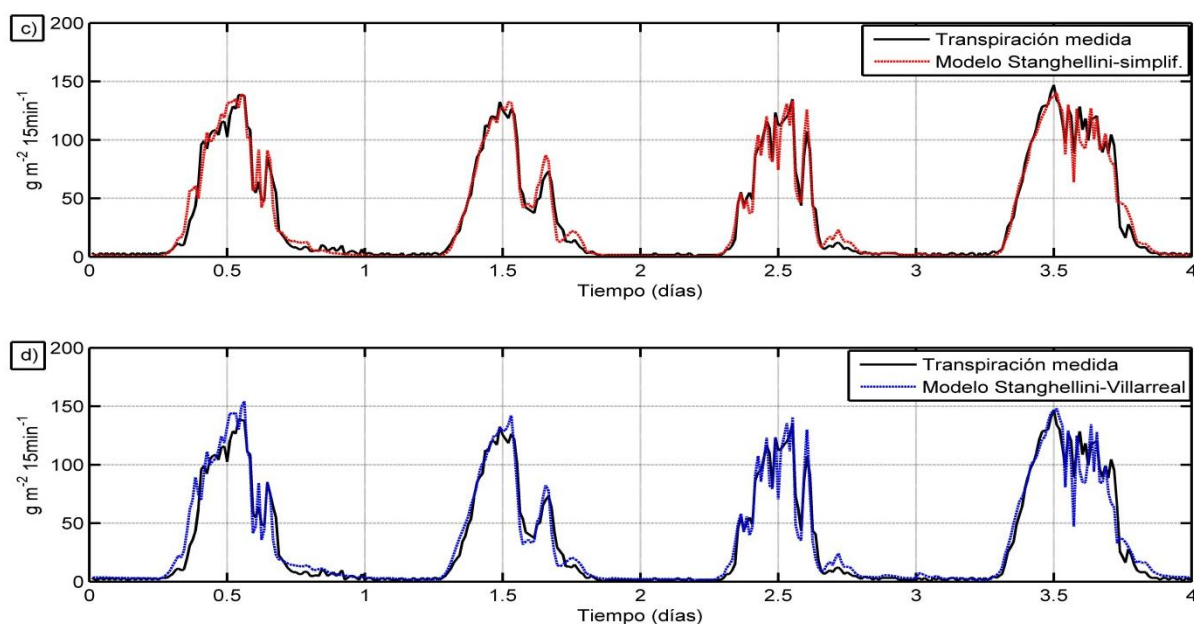


Fig. 5.16. Calibración del modelo de transpiración de c) Stanghellini-simplificado, d) Stanghellini usando las resistencias de Villarreal de 4 días para IAF de 3.00 – 3.02 [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$].

5.6 Resultados de la calibración para IAF= 3.0 – 3.02 [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$].

En los cuadros 5.13 al 5.16 se reportan los valores de los parámetros calibrados de cada uno de los modelos, los resultados de la regresión, y las distintas estadísticas de ajuste RMSE (raíz del cuadrado medio del error), MSE (suma del promedio de los errores) y el índice de ajuste del modelo, donde $c_1, c_2, \dots, c_n$ son los parámetros de los modelos y r_b es la resistencia aerodinámica, para 4 días de datos.

Cuadro 5.13. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo de Baille.

PARÁMETROS		Y = a x + b					RMSE	MSE	Índice de ajuste
Coef.A	0.31613	A	b	R ²	a (IC)	b (IC)	8.4204	70.903	0.991
Coef.Bd	25.0925	0.9534	2.1971	0.9644	0.9349	1.1685			
Coef.Bn	12.1647				0.9718	3.2256			

Cuadro 5.14. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo de Penman-Monteith (con resistencias de Wang y Boulard) sin DPV.

PARÁMETROS		Y = a x + b					RMSE	MSE	Índice de ajuste
c1	299.0846	A	b	R ²	a (IC)	b (IC)	11.685	136.55	0.9823
c2	0.066572	0.9564	1.9247	0.9316	0.9303	0.4693			
c3	5				0.9825	3.38			
c4	23.986922								

Cuadro 5.15. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo de Stanghellini versión simplificada.

PARÁMETROS		Y = a x + b					RMSE	MSE	Índice de ajuste
c1	21.40837	A	b	R ²	a (IC)	b (IC)	8.116	65.87	0.9914
c2	20	0.96259	0.62	0.96685	0.9446	-0.3807			
c3	1.36407				0.9805	1.62			
c4	0.0799								
rb	100.0846								

Cuadro 5.16. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo de Stanghellini con resistencias de Villarreal.

PARÁMETROS		Y = a x + b					RMSE	MSE	Índice de ajuste
c1	282.7948	A	b	R²	a (IC)	b (IC)	9.3768	87.923	0.988
c2	21.38859				0.9344	1.4930			
c3	21.4852				0.9755	3.7912			
c4	2.07E-08								
rb	81.106138								

En la figura 5.17 se muestran los ajustes obtenidos de la calibración, entre la transpiración medida y la transpiración estimada por cada modelo, mediante

una gráfica 1:1 y una ecuación de regresión lineal simple (línea roja) los parámetros de regresión se presentaron en los cuadros anteriores.

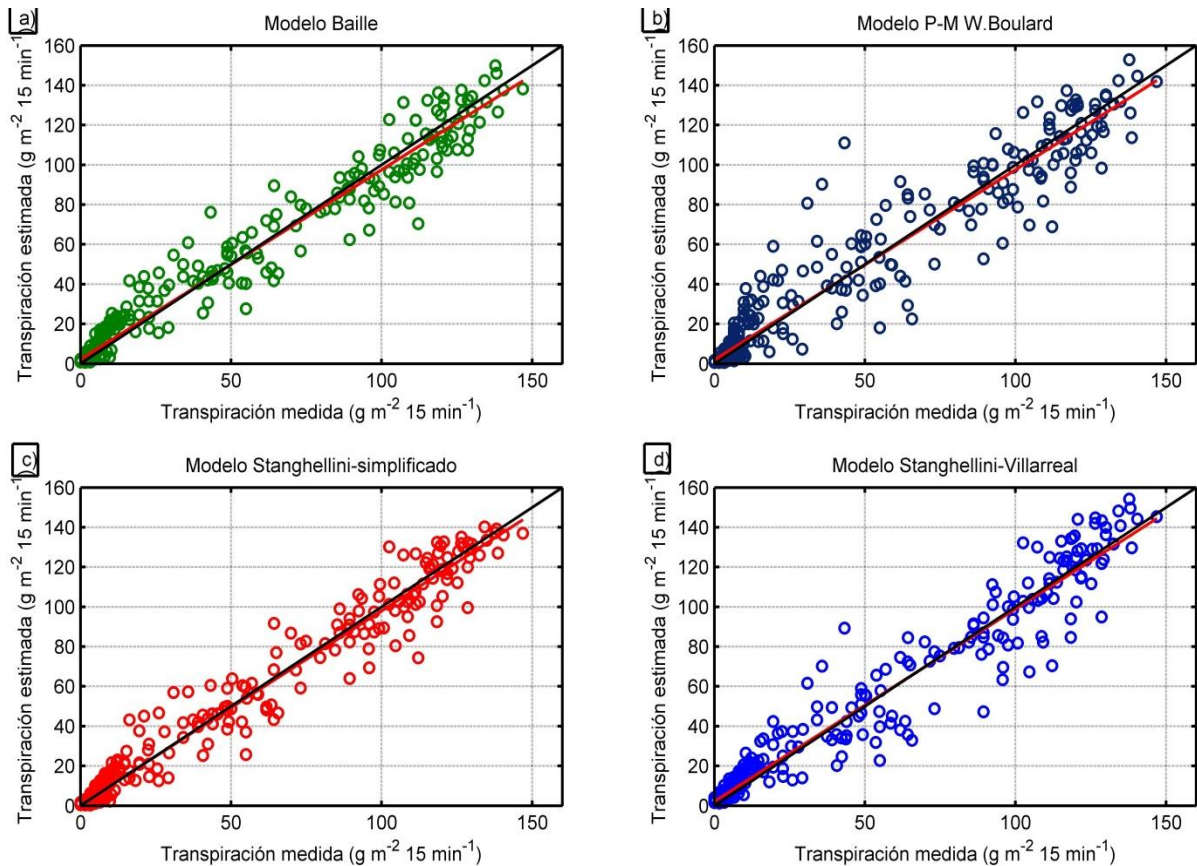


Fig. 5.17. Gráfica de regresión entre la transpiración medida y estimada por los diferentes modelos de transpiración y gráfica 1:1 para 4 días de calibración

5.7 Validación de los modelos para IAF= 3.0 – 3.02 [m² m⁻²].

Para evaluar la calidad de predicción de los modelos, se usaron los datos de 6 días del bloque 4 y se ejecutó una simulación usando los resultados obtenidos en la calibración.

Las figuras 5.18 y 5.19 reportan la comparación entre las predicciones de los modelos para índices de área foliar de 3.0 - 3.02 [m² m⁻²]. En las figuras 5.20 y

5.21 detallan la transpiración calculada con cada uno de los modelos y la transpiración medida en el invernadero con el lisímetro para dos días.

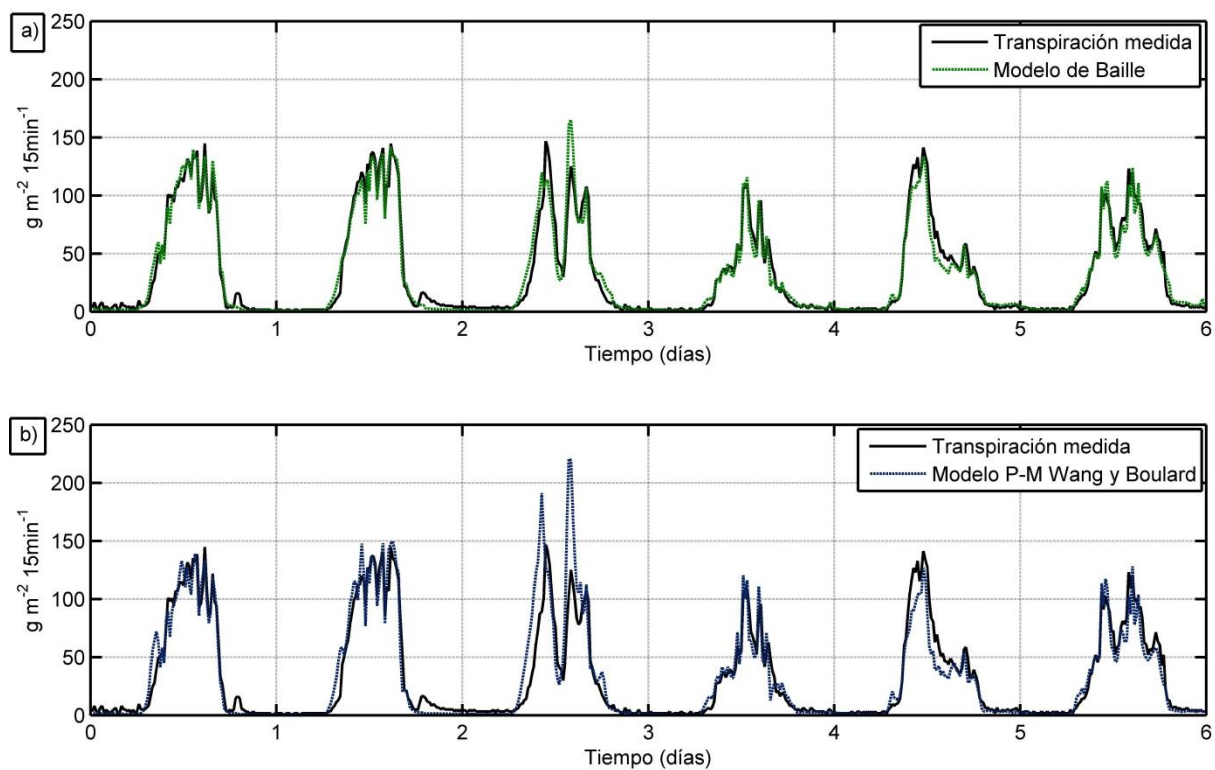


Fig. 5.18. Validación de los modelos de transpiración de a) Baille y b) Penman-Monteith (resistencias de Wang y Boulard) de 6 días para IAF de 3.00 – 3.02 $[\text{m}^2 \text{ m}^{-2}]$.

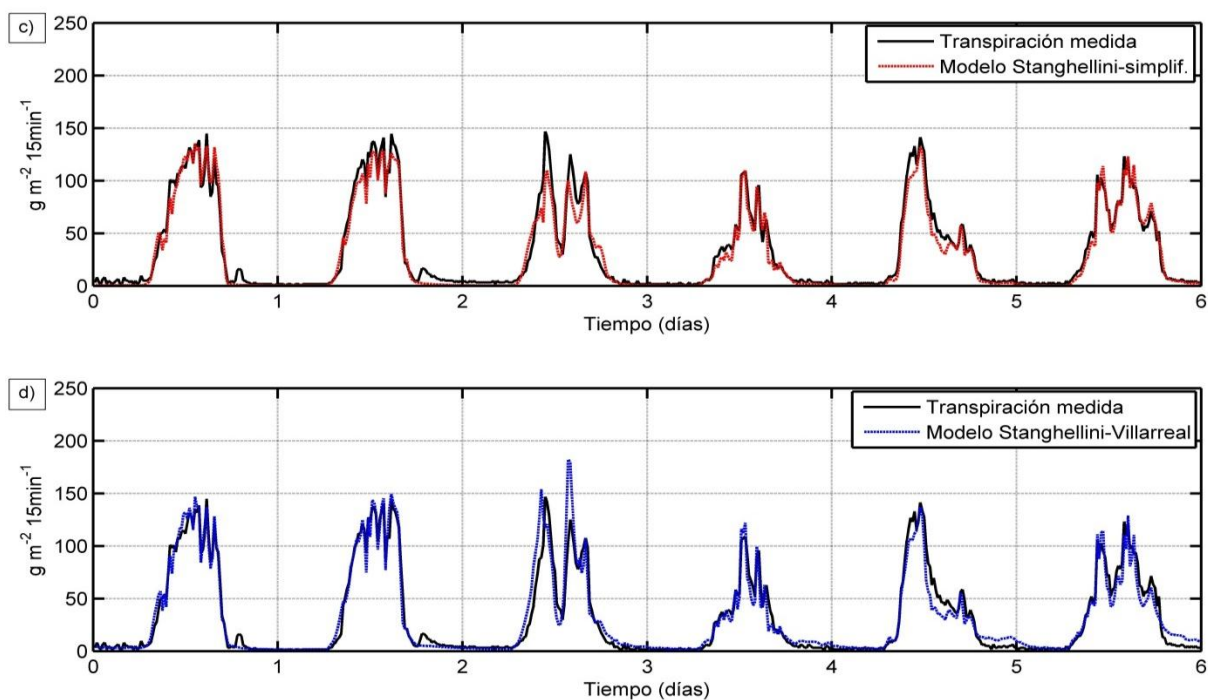


Fig. 5.19. Validación del modelo de transpiración de c) Stanghellini-simplificado, d) Stanghellini usando las resistencias de Villarreal de 6 días para IAF de 3.00 – 3.02 [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$].

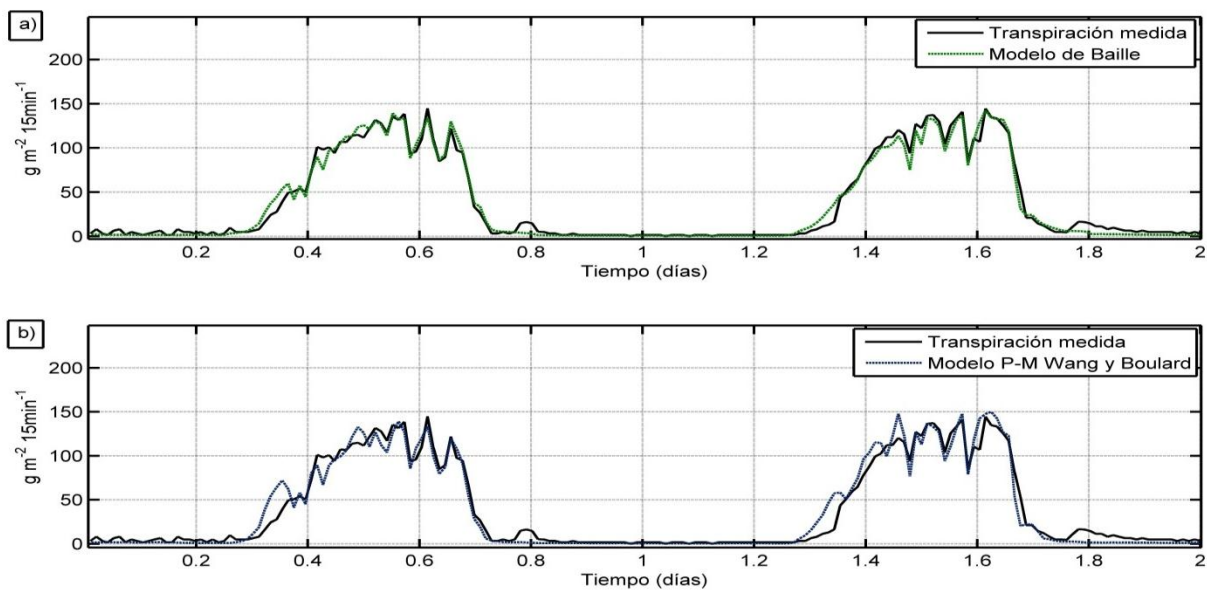


Fig. 5.20. Validación de los modelos de transpiración de a) Baille y b) Penman-Monteith (resistencias de Wang y Boulard) de los días 25 y 26 de Julio de 2011 para IAF de 3.00 – 3.02 [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$].

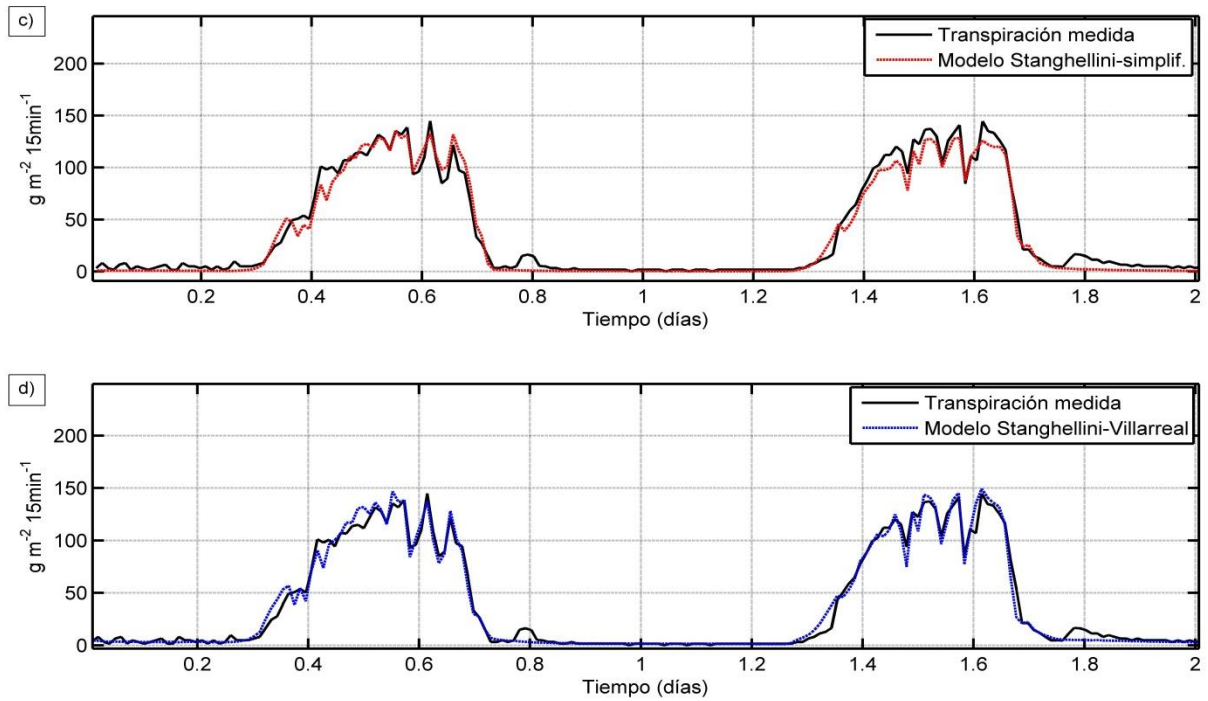


Fig. 5.21. Validación del modelo de transpiración de c) Stanghellini-simplificado, d) Stanghellini usando las resistencias de Villarreal de los días 25 y 26 de Julio de 2011 para IAF de 3.00 – 3.02 [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$].

5.8 Resultados de la validación para IAF= 3.0 – 3.02 [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$]

En los cuadros 5.17 al 5.20 se muestran los valores de los parámetros de la validación de cada uno de los modelos, los resultados de la regresión, y las distintas estadísticas de ajuste RMSE (raíz del cuadrado medio del error), MSE (suma del promedio de los errores) y el índice de ajuste del modelo, donde $c_1, c_2, \dots, c_n$ son los parámetros de los modelos y r_b es la resistencia aerodinámica.

Cuadro 5.17. Parámetros estadísticos de la validación del modelo de Baille.

PARÁMETROS		Y = a x + b					RMSE	MSE	Índice de ajuste
Coef.A	0.31613	A	b	R ²	a (IC)	b (IC)	8.2861	68.658	0.9896
Coef.Bd	25.0925	0.9552	0.6131	0.9604	0.939	-0.223			
Coef.Bn	12.1647				0.971	1.450			

Cuadro 5.18. Parámetros estadísticos de la validación del modelo de Penman-Monteith (con resistencias de Wang y Boulard) sin DPV.

PARÁMETROS		Y = a x + b					RMSE	MSE	Índice de ajuste
c1	299.0846	A	b	R²	a (IC)	b (IC)	15.043	226.28	0.968079
c2	0.066572				0.967	-1.5150			
c3	5				1.026	1.6199			
rb	23.986922								

Cuadro 5.19. Parámetros estadísticos de la validación del modelo de Stanghellini versión simplificada.

PARÁMETROS		Y = a x + b					RMSE	MSE	Índice de ajuste
c1	21.40837	A	b	R ²	a (IC)	b (IC)	8.35	69.735	0.989
c2	20	0.9373	-1.235	0.9664	0.9229	-1.9885			
c3	1.36407				0.9516	-0.4818			
c4	0.0799								
rb	100.0846								

Cuadro 5.20. Parámetros estadísticos de la validación del modelo de Stanghellini con resistencias de Villarreal.

PARÁMETROS		Y = a x + b					RMSE	MSE	Índice de ajuste
c1	282.7948	a	b	R²	a (IC)	b (IC)	10.3837	107.8214	0.983
c2	21.38859				0.9397	0.2302			
c3	21.4852				0.9803	2.3667			
c4	2.07E-08								
rb	81.106138								

La figura 5.22 contiene los ajustes obtenidos de la validación, entre la transpiración medida y la transpiración estimada por cada modelo, mediante una gráfica 1:1 y una ecuación de regresión lineal simple (línea roja), los parámetros de regresión se presentaron en las tablas inmediatamente anteriores.

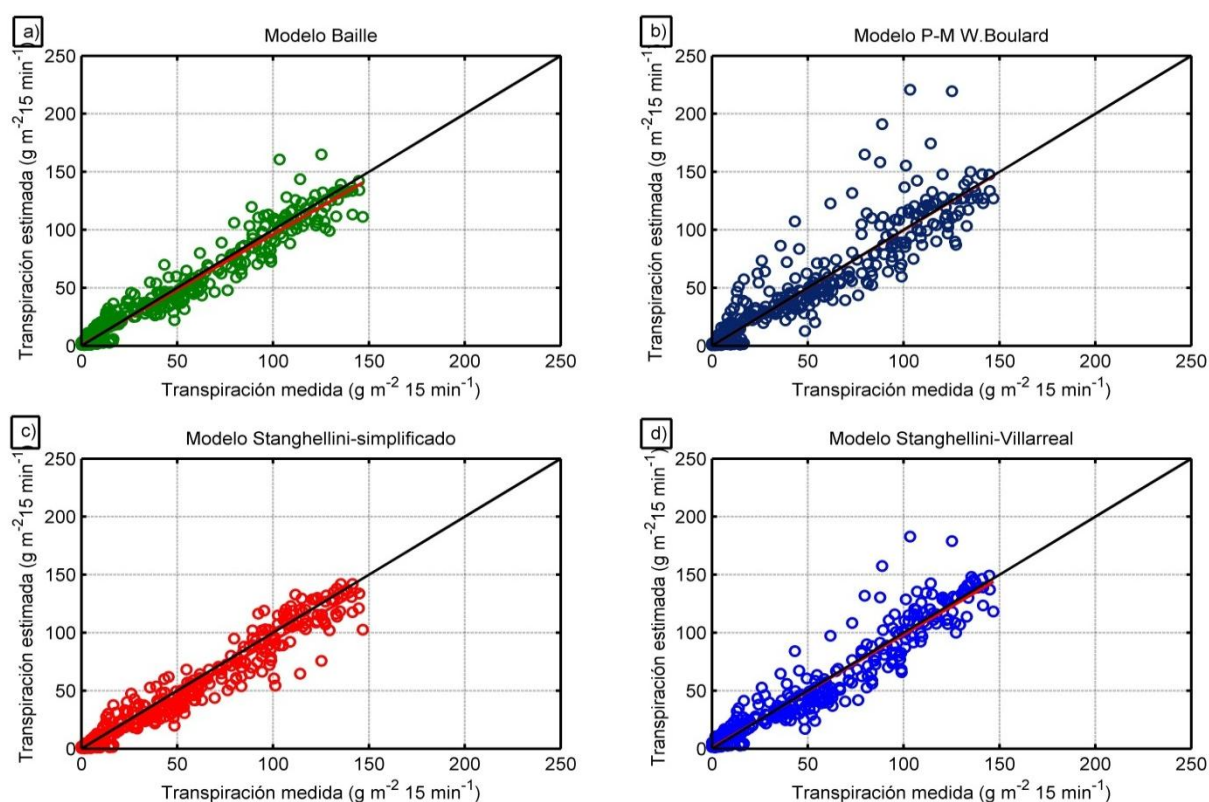


Fig. 5.22. Gráfica de regresión entre la transpiración medida y estimada por los diferentes modelos de transpiración y gráfica 1:1 para 6 días de validación.

En la figura 5.23 se reportan las variables climáticas medidas dentro del invernadero, que requieren los diferentes modelos de transpiración, en la figura 5.24 se muestra la transpiración medida dentro del invernadero con la balanza lisímetro. Las mediciones corresponden al bloque de datos 6 que comprende 18 Agosto-31 Agosto de 2011 para 14 días.

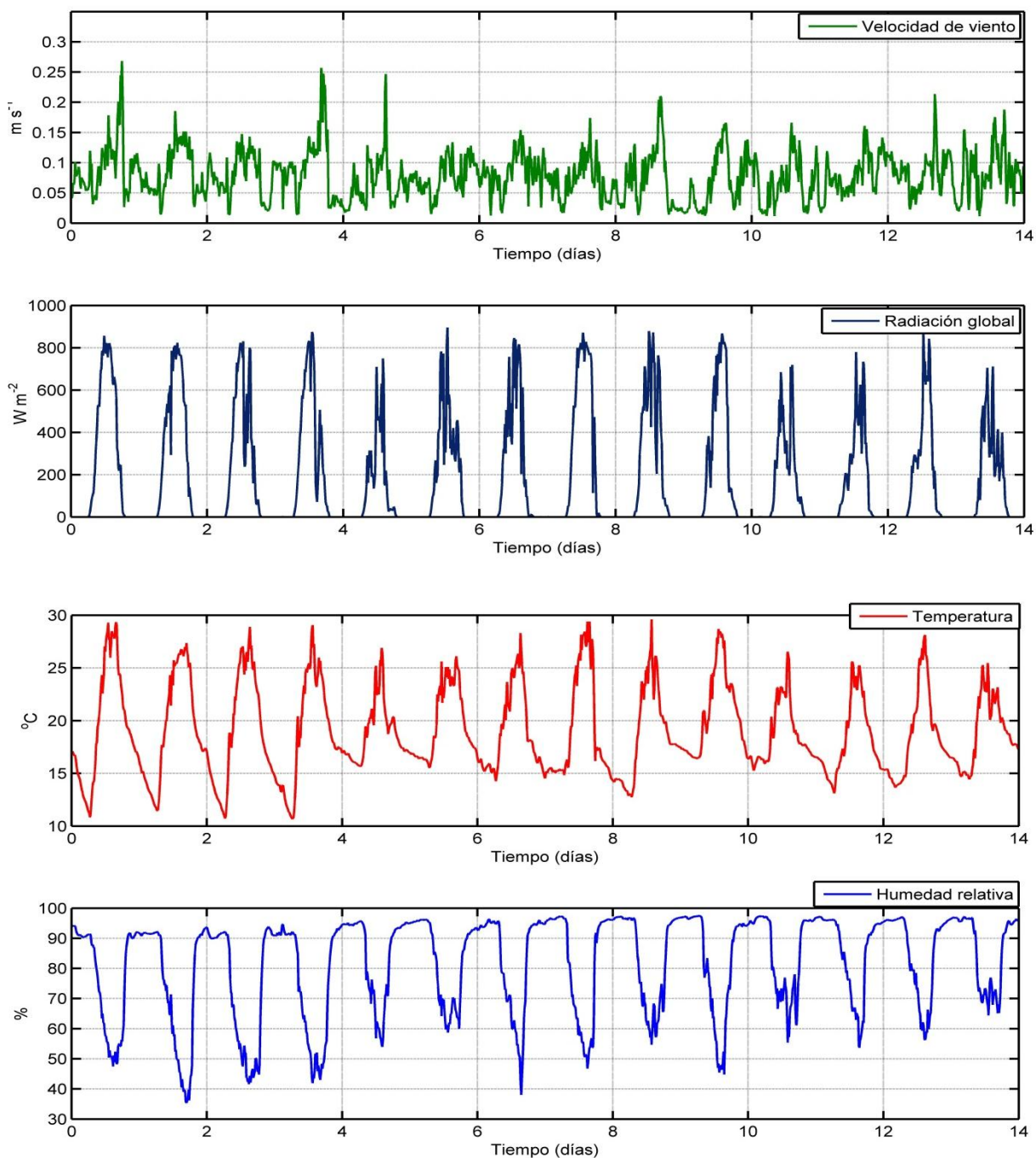


Fig. 5.23. Variables meteorológicas de 14 días medidas dentro del invernadero, en Chapingo, México. a) velocidad del viento, b) radiación solar global, c) temperatura, d) humedad relativa.

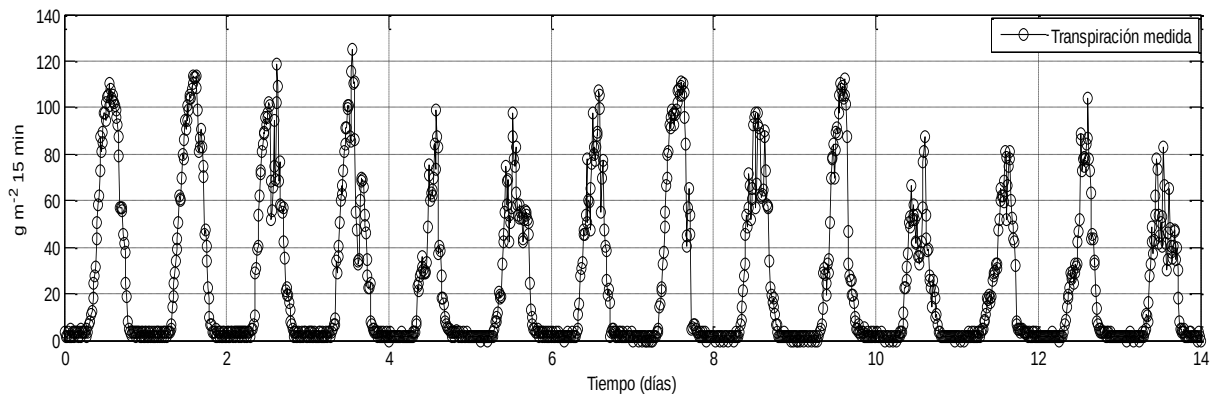


Fig. 5.24. Transpiración de un cultivo de jitomate en invernadero durante 14 días medida en Chapingo, México.

5.9 Calibración de los modelos para $IAF = 1.84 - 2.32 \text{ [m}^2 \text{ m}^{-2}\text{]}$.

La figura 5.25 muestra la simulación de la transpiración mediante los modelos de Baille y Stanghellini simplificado y con resistencias de Villarreal para 6 días de mediciones del bloque 6, para índices de área foliar de 1.84 a 2.32 $[\text{m}^2 \text{ m}^{-2}]$. Puede observarse que la calidad de predicción de los modelos es aceptable.

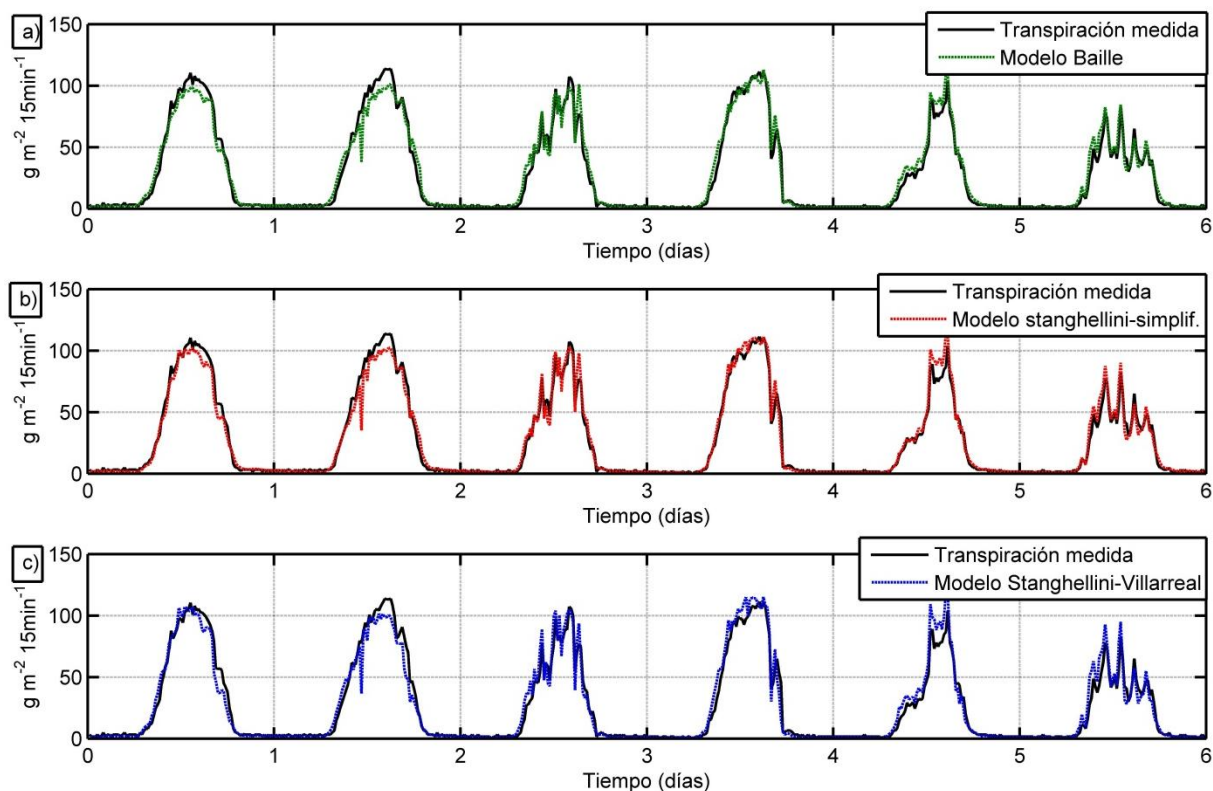


Fig. 5.25. Calibración de los modelos de transpiración de a) Baille y b) Stanghellini-simplificado y c) Stanghellini con resistencia de Villarreal de 6 días para IAF de $1.84 - 2.32 \text{ [m}^2 \text{ m}^{-2}\text{]}$.

5.10 Resultados de la calibración para IAF= $1.84 - 2.32 \text{ [m}^2 \text{ m}^{-2}\text{]}$.

En los cuadros 5.21 al 5.23 se observan los valores de los parámetros calibrados de cada uno de los modelos, los resultados de la regresión, y las distintas estadísticas de ajuste RMSE (raíz del cuadrado medio del error), MSE (suma del promedio de los errores) y el índice de ajuste del modelo, donde $c_1, c_2, \dots, c_n$ son los parámetros de los modelos y r_b es la resistencia aerodinámica.

Cuadro 5.21. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo de Baille.

PARÁMETROS		Y = a x + b					RMSE	MSE	Índice de ajuste
Coef.A	0.2683	A	b	R ²	a (IC)	b (IC)	5.7444	32.998	0.9931
Coef.Bd	32.349	0.9613	1.5909	0.9736	0.9483	1.0168			
Coef.Bn	22.000				0.9743	2.1651			

Cuadro 5.22. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo de Stanghellini versión simplificada.

PARÁMETROS		Y = a x + b					RMSE	MSE	Índice de ajuste
c1	44.8147	A	b	R ²	a (IC)	b (IC)	5.2359	27.415	0.9944
c2	60	0.9809	0.0254	0.9779	0.9688	-0.508			
c3	4.89				0.993	0.5598			
c4	0.00768								
rb	66.9989								

Cuadro 5.23. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo de Stanghellini con resistencias de Villarreal.

PARÁMETROS		Y = a x + b					RMSE	MSE	Índice de ajuste
c1	172.7012	A	b	R²	a (IC)	b (IC)	5.4534	29.7396	0.9938
c2	189.064				0.9587	0.5859			
c3	198.6781				0.9837	1.6913			
c4	3.41E-14								
rb	30.0								

En la figura 5.26 se presentan los ajustes obtenidos de la calibración, entre la transpiración medida y la transpiración estimada por cada modelo, mediante una gráfica 1:1 y una ecuación de regresión lineal simple (línea roja) los parámetros de regresión se presentaron en las tablas inmediatamente anteriores.

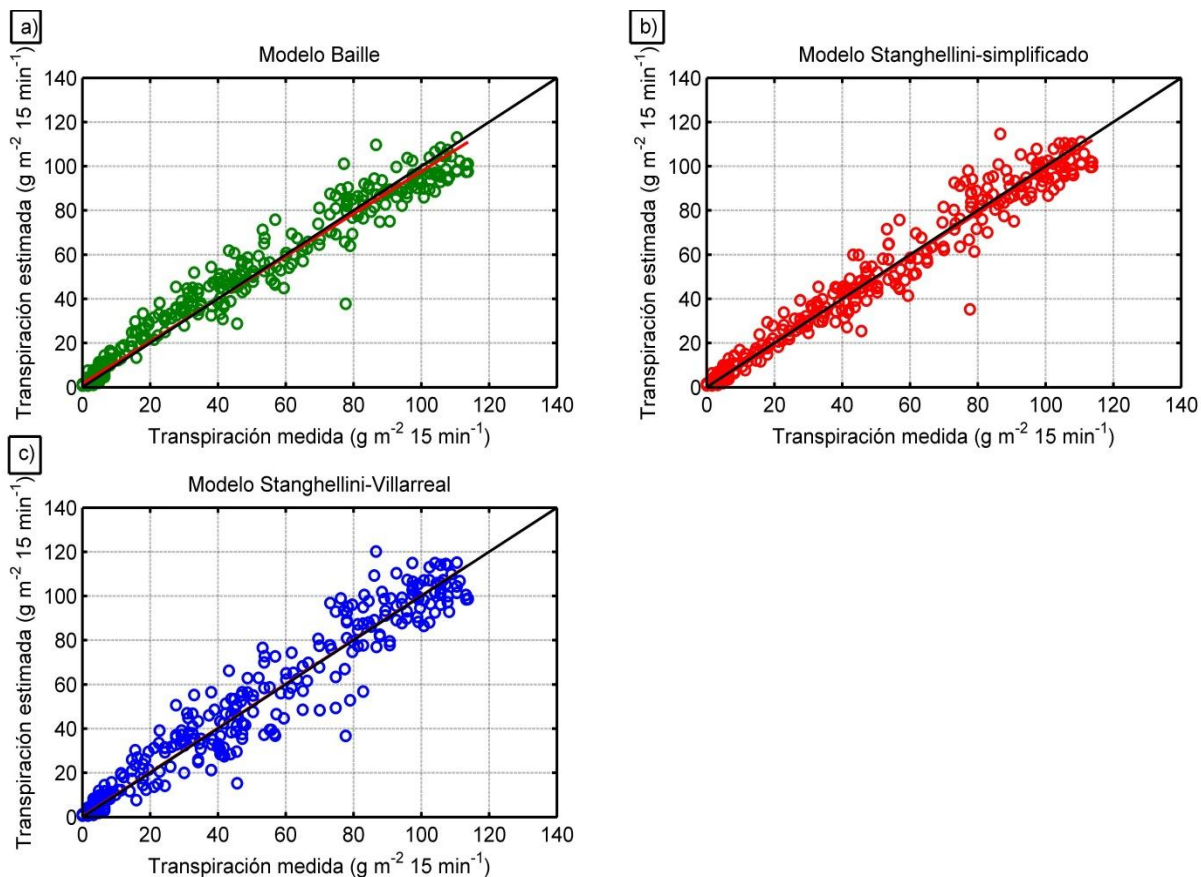


Fig. 5.26. Gráfica de regresión entre la transpiración medida y estimada por los diferentes modelos de transpiración y gráfica 1:1 para 6 días de calibración

5.11 Validación de los modelos para $\text{IAF} = 1.84 - 2.32 [\text{m}^2 \text{ m}^{-2}]$.

Para evaluar la calidad de predicción de los modelos, se usaron los datos de 8 días del bloque 6 y se ejecutó una simulación usando los resultados obtenidos en la calibración. La figura 5.27 muestra la comparación entre las predicciones de los modelos para índices de área foliar de $1.84 - 2.32 [\text{m}^2 \text{ m}^{-2}]$.

En la figura 5.28 se detalla la transpiración calculada con cada uno de los modelos y la transpiración medida en el invernadero con el lisímetro para dos días.

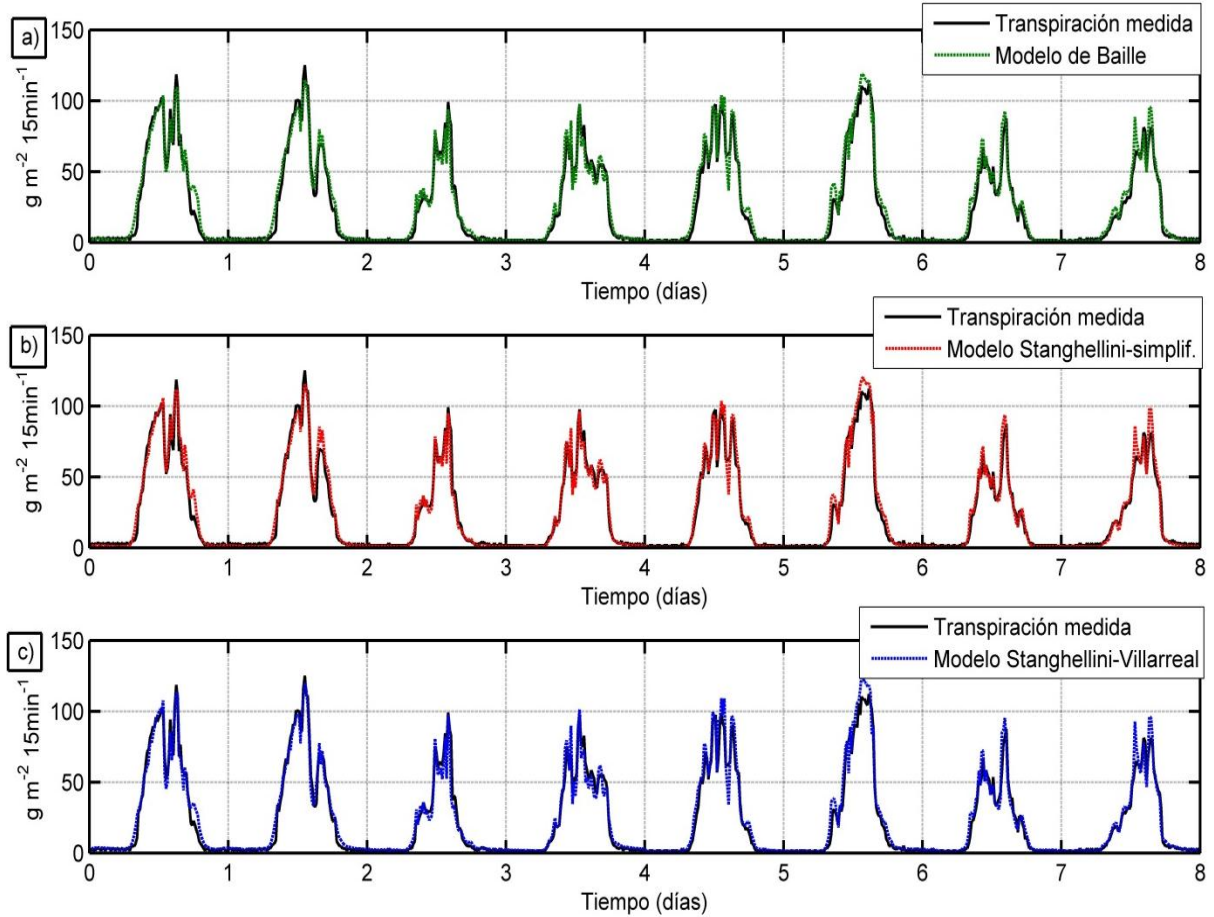


Fig. 5.27. Validación de los modelos de transpiración de a) Baille y b) Stanghellini-simplificado y c) Stanghellini con resistencia de Villarreal de 8 días para IAF de $1.84 - 2.32 [\text{m}^2 \text{m}^{-2}]$.

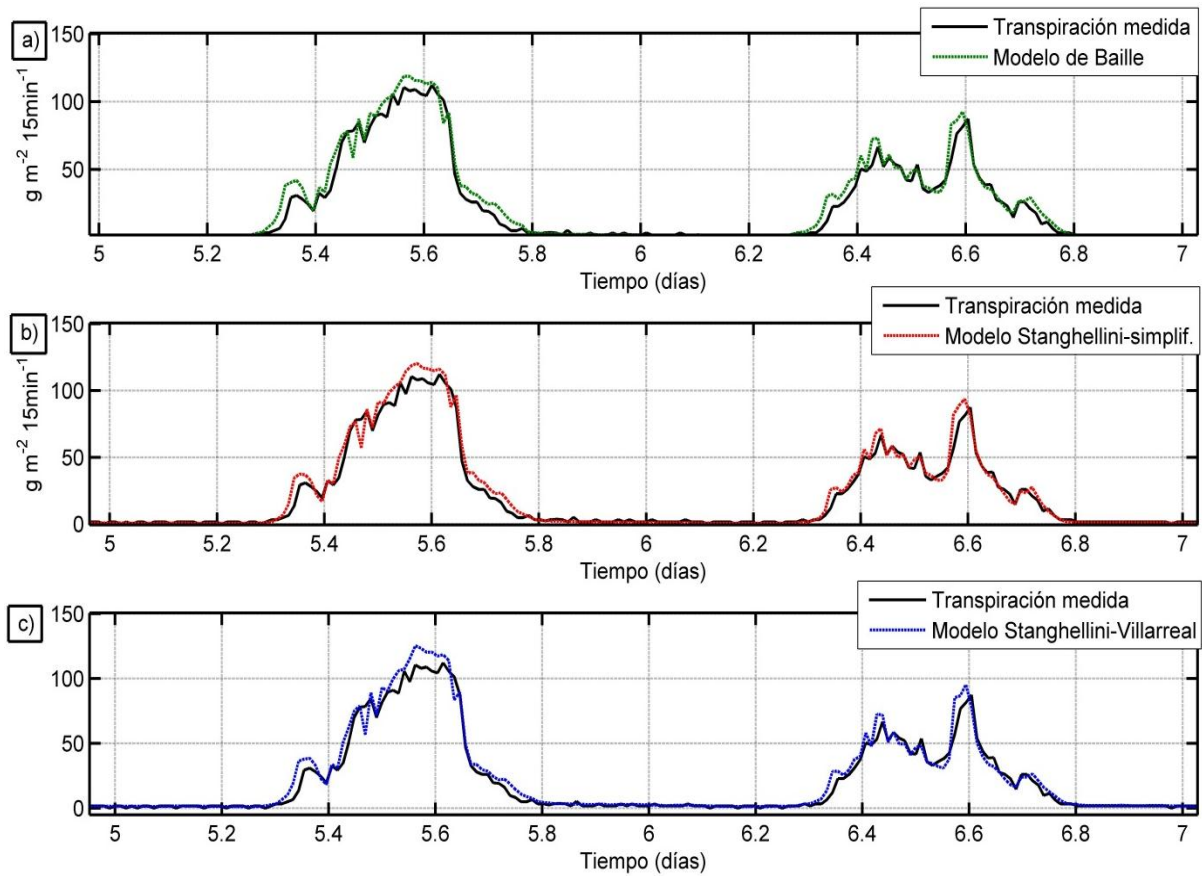


Fig. 5.28. Validación de los modelos de transpiración de a) Baille y b) Stanghellini-simplificado y c) Stanghellini usando la resistencias de Villarreal de los días 27 y 28 de Agosto de 2011 para IAF de $1.84 - 2.32 \text{ [m}^2 \text{ m}^{-2}\text{]}$.

5.12 Resultados de la validación para IAF= $1.84 - 2.32 \text{ [m}^2 \text{ m}^{-2}\text{]}$

En los cuadros 5.24 al 5.26 se muestran los valores de los parámetros de la validación de cada uno de los modelos, los resultados de la regresión, y las distintas estadísticas de ajuste RMSE (raíz del cuadrado medio del error), MSE (suma del promedio de los errores) y el índice de ajuste del modelo, donde $c_1, c_2, \dots, c_n$ son los parámetros de los modelos y r_b es la resistencia aerodinámica.

Cuadro 5.24. Parámetros estadísticos de la validación del modelo de Baille.

PARÁMETROS		Y = a x + b					RMSE	MSE	Índice de ajuste
Coef.A	0.2683	A	b	R ²	a (IC)	b (IC)	5.7281	32.811	0.9913
Coef.Bd	32.349	0.9951	1.5517	0.9680	0.9823	1.0582			
Coef.Bn	22.001				1.0079	2.0451			

Cuadro 5.25. Parámetros estadísticos de la validación del modelo de Stanghellini versión simplificada.

PARÁMETROS		Y = a x + b					RMSE	MSE	índice de ajuste
c1	44.8147	A	b	R ²	a (IC)	b (IC)	5.24	27.458	0.9932
c2	60	1.0232	0.0295	0.9748	1.0115	-0.4190			
c3	4.89				1.0348	0.4781			
c4	0.00768								
rb	66.9989								

Cuadro 5.26. Parámetros estadísticos de la validación del modelo de Stanghellini con resistencias de Villarreal.

PARÁMETROS		Y = a x + b					RMSE	MSE	Índice de ajuste
c1	172.7012	A	b	R²	a (IC)	b (IC)	5.6714	32.165	0.9914
c2	189.064				0.9773	0.6889			
c3	198.6781				1.0031	1.6828			
c4	3.41E-14								
rb	30.0								

En la figura 5.29 se reportan los ajustes obtenidos de la validación, entre la transpiración medida y la transpiración estimada por cada modelo, mediante una gráfica 1:1 y una ecuación de regresión lineal simple (línea roja), los parámetros de regresión se presentan en los cuadros 5.24 al 5.26.

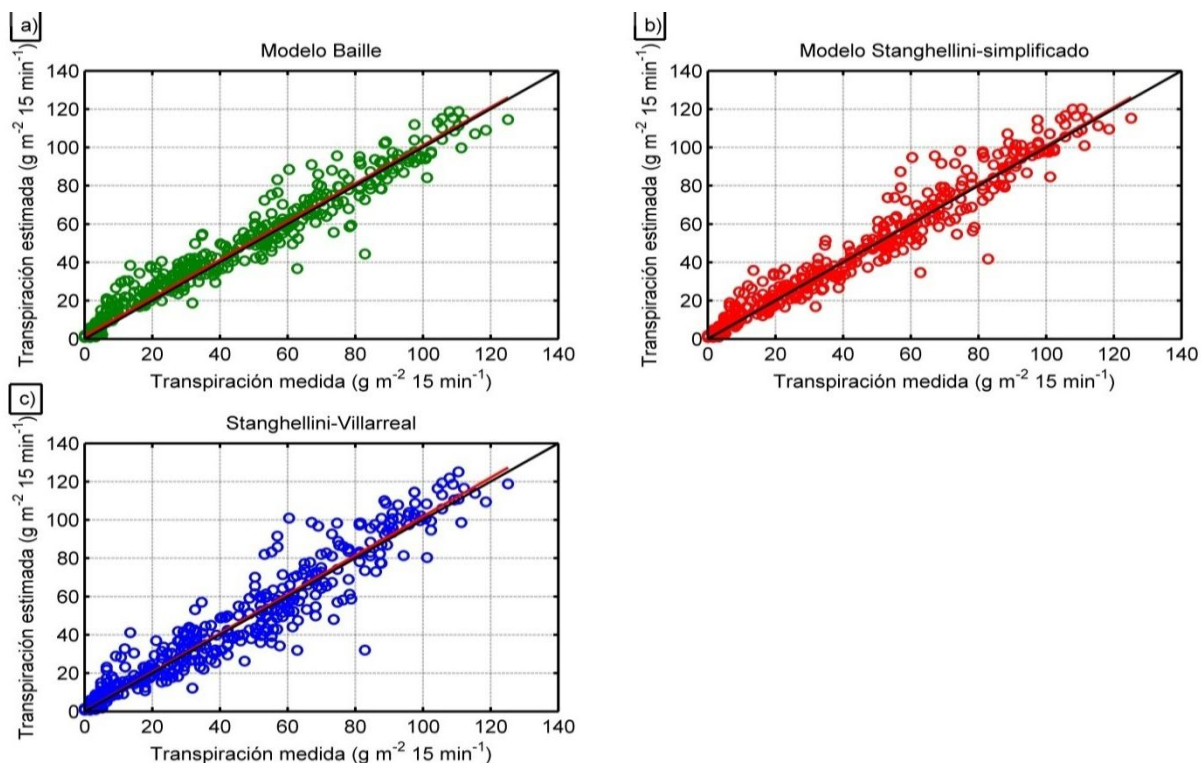


Fig. 5.29. Gráfica de regresión entre la transpiración medida y estimada por los diferentes modelos de transpiración y gráfica 1:1 para 8 días de validación.

Cuadro 5.27. Coeficiente de variación de la Calibración de cada modelo para índices de área foliar 2.3 – 3.02 [m² m⁻²].

MODELO	PARÁMETROS	COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LAS ESTIMACIONES (%)
BAILLE	Coef.A	1.918
	Coef.Bd	2.576
	Coef.Bn	15.083
MODELO P-M WANG Y BOULARD	c1	9.152
	c2	48.896
	c3	121.908
	c4	28484.7
	c5	2037.72
	c6	9.461
	c7	44.686
	rb	14.955

MODELO P-M WANG Y BOULARD SIN DPV	c1	9.132
	c2	48.832
	c3	121.516
	rb	14.922
MODELO STANGHELLINI SIMPLICADO	c1	20.929
	c2	22.151
	c3	28.059
	c4	31.567
	rb	5.173
MODELO STANGHELLINI VILLARREAL	c1	30.087
	c2	769.051
	c3	780.604
	c4	65.992
	rb	33.755

Cuadro 5.28. Coeficiente de variación de la Calibración de cada modelo para índices de área foliar 3.00 – 3.02 [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$].

MODELO	PARÁMETROS	COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LAS ESTIMACIONES (%)
BAILLE	Coef.A	2.625
	Coef.Bd	3.960
	Coef.Bn	22.687
MODELO P-M WANG Y BOULARD SIN DPV	c1	10.947
	c2	60.368
	c3	118.239
	rb	17.719
MODELO STANGHELLINI SIMPLICADO	c1	65.177
	c2	48.151
	c3	55.927
	c4	70.201
	rb	8.490
MODELO STANGHELLINI VILLARREAL	c1	55.681
	c2	8818.453
	c3	8842.085
	c4	120.1232
	rb	61.42681

Cuadro 5.29. Coeficiente de variación de la Calibración de cada modelo para índices de área foliar 1.84 – 2.32 [m² m⁻²].

MODELO	PARÁMETROS	COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LAS ESTIMACIONES (%)
BAILLE	Coef.A	2.023
	Coef.Bd	2.697
	Coef.Bn	15.649
MODELO STANGHELLINI SIMPLICADO	c1	14.493
	c2	22.479
	c3	29.242
	c4	36.131
	rb	5.873
MODELO STANGHELLINI VILLARREAL	c1	36.917
	c2	1309.686
	c3	1327.984
	c4	38725005
	rb	35.1510

5.13 Aplicación de riego

Debido a que es indispensable saber la cantidad de agua que se debe suministrar al cultivo de jitomate en invernadero y la hora de su aplicación, en los cuadros 5.30, 5.31 y 5.32 se muestran la cantidad de agua perdida por transpiración por cada unidad de radiación y también se presentan el consumo para distintos rangos de radiación y déficit de presión de vapor, esta información es útil para cuando se desea automatizar la programación riegos utilizando las variables antes mencionadas.

Cuadro 5.30. Muestra el consumo de agua por el cultivo por cada unidad de radiación

Transpiración / Radiación	General (Litros/m²)	Nublado (Litros/m²)	Intermedio (Litros/m²)	Soleado (Litros/m²)
MJ/m²	0.215	0.243	0.192	0.175
J/cm²	0.00215	0.00243	.00192	0.00175

Cuadro 5.31. Muestra el consumo de agua por el cultivo considerando diferentes valores de déficit de presión (kPa) de vapor y radiación (MJ).

mm/MJ o L/MJ por m2			
DPV/Rad	0-300	300-600	600-970
≤1.18	0.244	0.179	0.171
1.18 < x ≤ 2.36	0.407	0.246	0.190
>2.36	SD	0.264	0.204

Cuadro 5.32. Muestra el consumo de agua por el cultivo considerando diferentes valores de déficit de presión de vapor (kPa) y radiación (J/cm²).

mm/J/cm2 o L/ J/cm2			
DPV/Rad	0-300	300-600	600-970
≤1.18	0.00244	0.00179	0.00171
1.18 < x ≤ 2.36	0.00407	0.00246	0.00190
>2.36	SD	0.00264	0.00204

5.15 Discusión

5.15.1 Calibración de los modelos de transpiración

Dadas las diferencias existentes entre México y lugares en donde se calibraron los modelos que se discuten en este trabajo, resultó necesario recalibrar las ecuaciones con los que se determinan las resistencias

estomáticas y aerodinámica ya que en principio, las simulaciones hechas previas a la calibración no mostraron buen ajuste como se muestra en la figura 5.3 y 5.4. De acuerdo a los resultados obtenidos de la calibración de cada uno de los modelos y para diferentes índices de área foliar, se encontró lo siguiente.

El modelo que mejor ajuste mostró en todas las calibraciones fue el modelo de Stanghellini versión simplificada reportado en (Bontsema *et al* ., 2007), observando los cuadros 5.27 , 5.28, 5.29 donde se reportan los coeficientes de variación de la calibración de cada uno de los parámetros que intervienen en los modelos, se tiene que efectivamente los parámetros para los modelos de Baille y Stanghellini simplificado fueron los que tienen menor coeficiente de variación y todos los parámetros se calibraron sin ningún problema para índices de área foliar de $2.3 - 3.02 \text{ [m}^2 \text{ m}^{-2}]$ y $1.84 - 2.32 \text{ [m}^2 \text{ m}^{-2}]$, sin embargo para índices de área foliar de $3.00 - 3.02 \text{ [m}^2 \text{ m}^{-2}]$, los coeficientes de variación tienden a aumentar para ambos modelos, una posible explicación, es que se debe que estos modelos en particular fueron desarrollado para climas fríos donde la tasa de transpiración no es muy alta y al aplicarlo en una región más cálidas la calidad de ajuste, de sus predicciones tienden a disminuir.

No obstante, para el modelo de Penman-Monteith en las tres condiciones de área foliar muestra parámetros con coeficientes de variación muy altos de sus parámetros, lo que indica que estos parámetros son difíciles de calibrar. Para el caso del modelo de Stanghellini con resistencias de Villarreal a pesar de tener muy buen ajuste de igual forma presenta parámetros

con altos coeficientes de variación por lo que para fines de riego no es recomendable su uso.

De acuerdo a los cuadros 5.27, 5.28, 5.29 también se visualiza que la calibración de la resistencia aerodinámica (r_b) no presentó ningún problema ya que los valores para el coeficiente de variación que se presentan en dichos cuadros no son muy altos.

Se observa también que los mejores ajustes para estos modelo se dieron para índices de áreas foliar menores cuando la tasa de transpiración es menor, de igual manera, al observar la dispersión de los datos de la gráfica (figura 5.7, 5.17, 5.26) estos se distribuyen sobre la línea 1:1 donde la amplitud de dispersión de los datos con respecto a la línea indica el error existente en cada modelo encontrándose los menores errores para los modelos de Baille y Stanghellini.

La diferencia entre el modelo de Baille y Stanghellini simplificado es la forma matemática en el que se presentan, en realidad ambos son modelos teóricos y se derivan del análisis de los principios físicos tales como, balance de energía y masa, solo que el modelo de Baille es una forma linealizada del modelo de Penman- Monteith y la ecuación de Stanghellini es un poco más completa ya que considera más términos.

El segundo mejor modelo en esta investigación resultó ser el de Baille, por la simplicidad de su expresión matemática es factible su uso para predecir la transpiración ya que en su estructura sólo se requiere calibrar dos

parámetros y las variables de entrada son la que comúnmente se miden en un invernadero (radiación, temperatura y humedad relativa).

Dado que los valores obtenidos por Sánchez *et al.*, (2008) en Almería España para los parámetros radiativo y aerodinámico (0.49 parámetro radiativo, 11.2 y 8.28 para el término aerodinámico para el día y noche respectivamente) no se tiene un buen ajuste entre predicciones y mediciones para datos de Chapingo se realizó la calibración para estas nuevas condiciones mostrándose los resultados en el cuadro 5.3, 5.13 y 5.21 para los tres rangos de índices de área foliar.

El nivel de ajuste logrado mediante la estimación de los parámetros más importantes de los modelos de transpiración fueron muy buenos como se observa en la gráfica de dispersión entre la transpiración medida y la estimada para los tres bloques de datos analizados (figura 5.7, 5.17 y 5.26).

El nivel de ajuste de los modelos después del proceso de calibración mostrado en las figuras 5.5, 5.6, 5.15, 5.16 y 5.25 son excelentes. Los resultados de la calibración del modelo de Baille son ligeramente diferentes obtenidos por Sánchez *et al.* 2011 y Sánchez *et al.* 2008, en lo que se refiere al coeficiente radiativo y son diferentes respecto al parámetro aerodinámico.

En todos los bloques el término aerodinámico en el modelo de Baille fue mayor que los encontrados por Sánchez *et al.* (2008) y Medrano *et al.* 2008) contrario al término radiactivo en esta investigación los valores fueron menores.

La razón por la se trabajó con diferentes bloques de datos para rangos de área foliar diferentes, es para hacer más preciso el análisis, ya que en principio se tenía la idea que los modelos no presentarían igual ajuste para distintas etapas de cultivos (distintas área foliar).

La ventaja de dividir los datos en bloques para la calibración, es que los ajustes que se obtienen son mucho mejores que considerar una sola calibración para el ciclo de cultivo completo, y usar modelos calibrados separando las áreas foliares para fines de riego se hace más precisa la aplicación de agua para este cultivo en particular puesto que la predicción de los requerimientos hídricos se hace con suficiente confiabilidad.

5.15.2 Validación de los modelos de transpiración

Se sabe que para que un modelo calibrado pueda ser usado es necesario que este haya sido evaluado usando conjuntos de datos diferentes a los usados en la calibración, con la finalidad de que se muestre la eficiencia de la predicción que este pueda tener. Por lo que en este trabajo se realizó la validación para cada conjunto de datos (índices de área foliar de 2.3 – 3.02 [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$], 3.0 – 3.02 [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$] y para 1.84 – 2.32 [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$]) las validaciones se hicieron para 16 días del primer bloque, 6 días del segundo y 8 días para el tercer bloque.

Para los índices de área foliar 1.84 – 2.32 [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$] y 2.3 – 3.02 [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$], el mejor modelo que resultó de acuerdo al análisis de las estadísticas de prueba fue el de Stanghellini simplificado (Bontsema *et al.*, 2007).

En el periodo cuando la transpiración es máxima que corresponde a los índices de área foliar más alto ($3.00 - 3.02 \text{ [m}^2 \text{ m}^{-2}\text{]})$ el mejor ajuste fue para el modelo de Baille. Los valores de los coeficientes para los mejores modelos para distintos índice de área foliar se aprecian en el cuadro 5.11, 5.17 y 5.25. El cálculo de la radiación neta en cada uno de los modelos se hizo para un coeficiente de extinción de luz de 0.7

En especial el nivel de ajuste para cada uno de los modelos fueron muy buenos y el resultado se aprecia en las estadísticas mostradas en el cuadro 5.11, 5.17 y 5.25. En general los resultados obtenidos muestran que el término aerodinámico del modelo de Baille, aporta alrededor de 30-40 % de la transpiración total para la mayoría de los días. Los resultados encontrados en esta investigación son similares a los encontrados por otros investigadores (Boulard y Jemma 1993).

La información importante que se deriva en este trabajo es útil para la toma de decisión de cuánto y cuándo regar, por ejemplo, en el cuadro 5.30 se tiene el consumo hídrico del cultivo por cada MJ de radiación acumulada o por cada Joule cm^{-2} . Por ejemplo, para un día nublado se observa que se consumo 242.8 mL por cada MJ de radiación por metro cuadrado o bien 2.429 mL por cada J cm^{-2} , para un día soleado se tiene que se pierde 174.5 mL por cada MJ o 1.74 mL por cada J cm^{-2} de radiación acumulada y para un día entre nublado y soleado se transpira 191.5 mL por cada MJ^{-1} o 1.91 mL por cada $\text{J}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ de radiación esta información es útil cuando se pretende regar usando el método de radiación acumulada.

Debido al fenómeno de histéresis existente entre la transpiración y la radiación como lo reporta Ramírez (2005) y Martínez (2008), se tiene que para un valor de la radiación le corresponde dos valores distintos de transpiración, debido a que en este fenómeno, el déficit de presión de vapor juega un papel importante, regar por el método de radiación acumulada, puede no ser la mejor forma de programar riegos ya que no considera el efecto del déficit de presión de vapor, por tal razón se presenta el cuadro 5.30 y 5.31, donde se sintetiza la transpiración que se presenta para distintos rangos de radiación y déficit de presión de vapor, con estos datos es posible implementar un programa de computo que sea capaz de tomar decisiones de riegos considerando ambas variables. Esta sería la manera más precisa de determinar cuándo realizar los riegos y que volumen aplicar, obviamente a estos valores se le debe añadir un porcentaje de drenaje y lavado que es de aproximadamente 25 al 30 %.

En realidad como resultado del análisis de varianza hecha a la transpiración estimada por los modelos se concluye que con un nivel de significancia de 95 % no se rechaza la hipótesis de que las predicciones hechas por cada uno de los modelos sean un tanto cuanto similares.

Capítulo 6. CONCLUSIÓN

Los modelos de transpiración de Stanghellini usados en Bontsema *et al.* (2007) y de Baille permite predecir en forma aceptable el comportamiento de las tasas de transpiración de un cultivo de jitomate bajo condiciones de invernadero y condiciones de clima templado. Se observa que el modelo de Stanghellini predice mejor la tasa de transpiración para los índices de área foliar menor.

Aparentemente, para las condiciones climáticas y de cultivo estudiadas, el término aerodinámico del modelo tiene un aporte de 30-40% de la transpiración total del cultivo.

En esta investigación se encontró que para el modelo de Baille los ajustes fueron excelentes, por lo que se concluye que es un modelo que puede usarse sin duda alguna para determinar el consumo hídrico en jitomate, además de que por la sencillez del modelo es posible automatizar la programación de riegos, mediante alguna sentencia en el que al perderse un cierto volumen acumulado por transpiración, active un evento de riego.

El modelo de Stanghellini simplificado resultó ser el mejor modelo en esta investigación ya que todos los indicadores de ajuste fueron mejores que el de Baille en la mayoría de los casos, no obstante la implementación de este modelo para la gestión de riegos en invernadero es un poco más difícil porque incluye más variables en comparación el de Baille.

El modelo que más errores mostró fue el de Penman – Monteith ya que aunque los puntos de dispersión se concentraron sobre la línea 1:1 como lo indican las figuras 5.7, 5.17 y 5.26 para la calibración y en las figuras 5.12, 5.22 y 5.29 para la validación, la amplitud de los datos con respecto a la línea fueron mayores por lo tanto mayor error.

Otra de las conclusiones del modelo anterior es que las estadísticas de ajuste no mejoraron al incluir el término que modela la influencia del déficit de presión de vapor en la expresión de la resistencia estomática (ecuación 2.22), por lo que al considerar solo el término de radiación simplifica su estimación.

El modelo de Stanghellini con las resistencias usadas por Villareal *et al.* (2012) también sus ajustes fueron aceptables. Por lo que se puede usar para determinar la transpiración.

BIBLIOGRAFIA

Allen G.R. 2006. Estudio FAO 56 riego y drenaje. Evapotranspiración del cultivo
Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. and Smith M. 1998. Crop Evapotranspiration:
Guidelines for computing crop water requirements irrigation and drainage paper
56. FAO. Roma, Italia.

Bakker J.C., Bot G., Challa H., Van de Braak N.J. 1995. Greenhouse climate
control an integrated approach. Wageningen Pers.

Bailey B., Montero J., Biel C., Wilkinson D, Anton A., Joliet O.
1993. Transpiration of *Ficus benjamina*: comparison of measurements with
predictions of the Penman-Monteith model and a simplified version. *Agric. For.
Meteorol.*, 65: 229-243.

Baille B., Baille A., Claude L. 1994. A simplified model for predicting
evapotranspiration rate of nine ornamental species vs climate factors and leaf
area. *Scientia Horticulturae* 59 (1994) 217-232.

Baille B., Baille A., Claude L. 1994b. Canopy surface resistances to water vapor
transfer for nine greenhouse pot plant crops. *Scientia Horticulturae* 57 (1994)
143-155.

Baptista J., Bailey., Meneses F., Navas M. 2010. Greenhouses climate modelling. Test, adaptation y validation of a dynamic climate model. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Spanish Journal of Agricultural Research 2010 8(2), 285-298.

Bass R. and van Rijssel E. 2006. Transpiration of glasshouse rose crops: evaluation of regression models. Acta Horticulturae 718: 547-554.

Bonstema J et al., 2007. online monitoring van transpiratie en fotosyntheseactiviteit. Wageningen UR Glastuinbouw.

Boulard T., Baille a., Mermier M., Vilette F. 1991. Mesures et modélisation de la résistance stomatique foliaire et de la transpiration d'un couvert de tomate de serre. Agronomie 11, 259-274.

Boulard T and Wang S. 2000. Greenhouse Crop transpiration simulation from external climate conditions. Agric. For. Meteorol. 100: 25-34.

Byun-Woo Lee and Jae-Hoon Shin. 1998. Optimal irrigation management system of greenhouse tomato based on stem diameter and transpiration monitoring. by the Asian federation of information technology in agriculture.

Castellanos Z.J. 2009. Manual de producción de tomate en invernadero. 1e ed. Ed. Intagri. Celaya Gto.

Colinas L. M. T. 1998. Curso de fisiología vegetal. Apuntes sobre el tema del agua Universidad Autónoma Chapingo, departamento de fitotecnia, chapingo México.

Demrati H., Boulard T., Fatnassi H., Bekkaoui A., Majdoubi H., Elattir H., Bouirden L. 2007. Microclimate and transpiration of a greenhouse banana crop. *Biosystems engineering* 98, 66-78 by Elsevier.

Fernández D., Orgaz F., Fereses E., López J., Céspedes A., Pérez J., Bonachela S., Gallardo M. 2001. Programación de riego de cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudeste español. Editorial CAJAMAR. Almería España.

García M. y Vázquez O. 2004. Programación de riego en invernadero por el método de radiación. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Irrigación. Chapingo México.

García R.A. 2009. Modelos para simulación y control del clima de un invernadero con ventilación natural. Tesis de maestría. Ingeniería agrícola y Uso Integral del Agua. Biosistemas.

Giacomo Gerosa. 2011. Evapotranspiration from measurements to agricultural and environmental applications. 1a ed. In Tech Ed. Cap. 14.

Gil M. F. 1995. Elementos de fisiología vegetal. Ediciones mundi prensa, 1ª ed.

Goudriaan J. and H.H. van Laar. 1994. Modeling potential crop growth processes. Textbook with exercises. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.

Heuvelink E. 2005. Tomatoes. Editorial CABI publishing Wageningen University. The Netherlands.

Hopkins G. Williams.1995. Introduction to plant physiology.1^a ed. John wiley& sons, inc. Ed. The university of western Ontario. EUA.

Jolliet, O. and Bailey, B.J., 1992. The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses: measurements and models comparison. Agric. For. Meteorol., 58: 43-62.

Katsoulas N., Baille A., Kittas C. 2002. Influence of leaf area index on canopy energy partitioning and greenhouse cooling requirements. Biosystems Engineering (2002)83(3), 349-359.

López C., Olivera M., Herrera G. 2008. Simulation of greenhouse tomato crop transpiration by two theoretical models.Acta horticulturae No. 797:145-150.

Martínez R. A. 2008. Evaluación de la transpiración de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) en invernadero. Tesis. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Irrigación.

Medrano E., Lorenzo P., Cruz S., Ignacio M. 2005. Evaluation and modelling of greenhouse cucumber-crop transpiration under high and low radiation conditions. Scientia Horticulturae 105 (2005) 163–175.

Medrano E. C. 1999. Gestión de riego en cultivo de pepino (*Cucumis Sativus* L.) en sustrato: evaluación de la transpiración durante la ontogenia. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

Monteith J.L. and Unsworth M.H. 2008.Principles of environmental physics.Third edition. Academic Press. Amsterdam.

Montero J.I., Antón A., Muñoz P., Lorenzo P. 2001. Transpiration from geranium grown under high temperatures and low humidities in Greenhouse. Agric. For. Meteorol., 107 (2001) 43-62.

Prenger J.J., Fynn P.R., Hansen C.R. 2002. A comparison of four evapotranspiration models in a greenhouse environment. ASAE Vol. 45(6)1779-1788.

Ramírez A. J. A. 2005. Control Jerárquico multi objetivo de crecimiento de cultivos bajo invernadero. Tesis Doctoral. Universidad de Almería.

Sánchez J.A. 2008. Modelado de la transpiración de un cultivo de tomate bajo invernadero para el diseño de sistemas de control de riego. XXIX Jornadas de Automática. Tarragona, España. 8 pp.

Sánchez J.A, Rodríguez F., Guzman J.L., Berenguel M. 2011. Modelling of tomato crop transpiration dynamics. Acta Horticulturae 893: 729-738.

Sinha K. R. 2004. Modern plant physiology. 1a ed. Alpha Science International Ltd. Ed. Pangbourne England. UK.

Stanghellini C. and Tackx de Jong. 1995. A model of humidity and its applications in a greenhouse. Agric. For. Meteorol. 76 (1995) 129-148.

Stanghellini C. 1987. Transpiration of greenhouse crops and aid to climate management. Instituut voor Mechanisatie Arbeid en Gebouwen, Wageningen Netherlands.

Stanghellini W, Van Meurs TH.M. 1992. Environmental control of greenhouse crop Transpiration.J. agric.Engng Res. (1992) 51, 297-311.

Teh C.B.S. 2006.Introduction to mathematical modeling of crop growth.1a ed. BrownWalker Press.

ThorneyH.M J. and Johnson R.I .1990.Plant and crop modeling.A mathematical approach to plant and crop physiology.1a ed. Clarendon press-Oxford. Ed. New York.

Valera M., Molina A., Peña F. 2002. Climatización de invernaderos. Universidad de Almería. España.

Van Straten G., Van Willigenburg G., Van Henten E., Van Ootenghem R. 2011. Optimal control of greenhouse cultivation.Editorial CRC Press.

Villarreal G., Kacira M., Rodriguez F., Kubota C., Giacomelli G., Linker R., Arbel A. 2012. Comparison of three evapotranspiration models for a greenhouse cooling strategy with natural ventilation and variable high pressure fogging.Scientia Horticulturae 134 (2012) 210–221.

Von Zabeltitz C. 2011. Integrated Greenhouse systems for mild climates.Climate, conditions, design, construction, maintenance, climate control.Editorial Springer.

D. Wallach, D. Makowski, J.W. Jones. 2006. Working with Dynamic Crop Models. First edition.Elsevier.The Netherlands.

Wang S. and Boulard T. 2000. Predicting the microclimate in a naturally ventilated plastic house in a Mediterranean climate. J. agric. Engng Res. (2000) 75, 27-38

Yang, X., Short, T.H., Fox, R.D. and Bauerle, W.L., 1990. Transpiration, leaf temperature and stomatal resistance of a greenhouse cucumber crop. Agric. For. Meteorol., 51: 197-209.

ANEXOS

ANEXO1. Muestra la dimensión característica de la hoja de jitomate para los distintos bloques de datos.

Bloque de datos	Dimensión característica (m).
3	0.35
4	0.33
5	0.32
6	0.28

ANEXO 2. Análisis de varianza de las predicciones de la transpiración con los 4 modelos para para índices de área foliar 2.3 – 3.02 [m² m⁻²].

Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	1509.5	3	503.17	0.24	0.868
Error	12835027.36	6140	2090.4		
Total	12836536.86	6143			

ANEXO 3. Análisis de varianza de las predicciones de la transpiración con los 4 modelos para índices de área foliar 3.00 – 3.02 [m² m⁻²].

Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	4091.24	3	1363.75	0.8	0.4937
Error	3920457.37	2300	1704.55		
Total	3924548.61	2303			

ANEXO 4. Análisis de varianza de las predicciones de la transpiración con los 4 modelos para índices de área foliar 1.84 – 2.32 [m² m⁻²].

Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	291.698	2	145.849	0.15	0.8611
Error	2244780.828	2301	975.568		
Total	2245072.526	2303			