



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

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA



**ANÁLISIS DE LA HUMEDAD EN UN INVERNADERO
SEMICERRADO CON CULTIVO DE JITOMATE (*Solanum
lycopersicum*) MEDIANTE MODELOS DE SIMULACION**

TESIS

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

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

PRESENTA:

AZUCELLI MAYTHE MAURICIO PÉREZ



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



Febrero 2015
Chapingo, Estado de México

**ANÁLISIS DE LA HUMEDAD EN UN INVERNADERO SEMICERRADO CON
CULTIVO DE JITOMATE (*Solanum lycopersicum*) MEDIANTE MODELOS
DE SIMULACIÓN**

Tesis realizada por **Azucelli Maythe Mauricio Pérez** 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

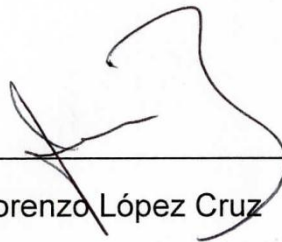
INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR: _____



Dra. Raquel Salazar Moreno

ASESOR: _____



Dr. Irineo Lorenzo López Cruz

ASESOR: _____



Dr. Abraham Rojano Aguilar

DEDICATORIA

A mi madre MARICELA PÉREZ PÉREZ, ¡una gran mujer! por todo ese esfuerzo para sacarnos adelante, el gran amor, amistad incondicional, compañía, comprensión, corregir mis faltas y celebrar mis triunfos. Por lo que soy y por todo el tiempo que te robe pensando en mí...Te adoro ¡lo logramos!

A mi padre JOSÉ ANTONIO MAURICIO GARCÍA, este logro lo comparto contigo como un testimonio de cariño, por creer en mí, por todos los consejos, porque sin escatimar esfuerzo alguno, has sacrificado gran parte de tu vida para formarme. Sobre todo por tu amor. Te adoro.

A mis hermanos JOSÉ y LUIS que me aman sin condiciones, por ser los acompañantes de mis primeras aventuras, por el impulso, por escucharme cuando lloraba y consolarme, Dios envió a mis mejores amigos a ser mis hermanos. Los amo.

A mis amados abuelos HERMENEGILDO, ADELA, ELIAZAR y EPIFANIA constructores y realizadores de sueños, que siempre están en mi corazón y han sido un pilar en mi vida. Por su infinito amor y enseñanzas. Los quiero mucho.

A EDILBERTO, mi fortaleza, quien ha visto los sin sabores y alegrías de mi vida y las ha acompañado todas dándome su mano fuerte para no dejarme caer en los momentos de incertidumbre; a su incomparable familia por hacerme parte de sus vidas. Te amo.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico que fue indispensable para llevar a cabo las actividades académicas durante mi estancia en el posgrado.

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

Al programa de posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma Chapingo, por brindarme la oportunidad de realizar los estudios de maestría.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECyT), por la beca otorgada para la conclusión de esta investigación.

A la Dra. Raquel Salazar Moreno, que con su acertada dirección, sugerencias y motivación hizo posible la culminación de este trabajo.

Al Dr. Irineo L. López Cruz, por sus sugerencias, experiencia y el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

Al Dr. Abraham Rojano Aguilar, por las sugerencias al escrito final.

Al Dr. Uwe Schmidt, por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

A mis amigos por aportar felicidad y diversión a mi vida.

A ti Dios por hacer realidad mis sueños ¡Gracias!

DATOS BIOGRÁFICOS DEL AUTOR

Nació el 12 de enero de 1989 en la colonia Guadalupe Grijalva perteneciente al municipio de Frontera Comalapa, Chiapas. Realizó sus estudios de educación básica en la primaria “José Emilio Grajales” y en la telesecundaria No. 110 en la misma colonia de nacimiento.

En el año 2005 ingresó a la Universidad Autónoma Chapingo para cursar la preparatoria agrícola y una vez concluida ingresa al departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola donde termina sus estudios de licenciatura obteniendo el título de Ingeniero Mecánico Agrícola por mérito académico en el año 2012.

En el año 2012 fue aceptado para ingresar a la Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso integral del agua.

ANÁLISIS DE LA HUMEDAD EN UN INVERNADERO SEMICERRADO CON CULTIVO DE JITOMATE (*Solanum lycopersicum*) MEDIANTE MODELOS DE SIMULACION

ANALYSIS OF HUMIDITY IN A SEMICLOSED GREENHOUSE WITH TOMATO CROP (*Solanum lycopersicum*) BY MODELS OF SIMULATION

Azucelli Maythe Mauricio Pérez¹
Raquel Salazar Moreno²

RESUMEN

Las ventajas de los invernaderos semicerrados son el ahorro de agua y energía, así como el aumento en el rendimiento y calidad de los productos. Sin embargo, uno de los retos de este sistema es el control de la humedad. Esta investigación utiliza la información de un invernadero semicerrado con cultivo de tomate, que se encuentra en el Instituto de Horticultura en la Universidad Humboldt de Berlín. Dos casos se analizan: 1) Un invernadero completamente cerrado en donde sólo los procesos de transpiración y condensación están presentes; 2) Cuando se permite ventilación natural y se incluye en el balance de masa de vapor de agua. Para el primer caso, sólo fue necesaria la calibración, los dos parámetros que cambian más son la resistencia de la capa límite y el coeficiente de extinción de la radiación. En el segundo modelo se realizó el análisis de sensibilidad antes de la calibración, con el calor latente de vaporización y el coeficiente de extinción de la radiación como los parámetros más sensibles. En general, los dos modelos simulan el comportamiento de la humedad de manera aceptable.

Palabras clave: Transpiración, condensación, ventilación, calibración, análisis de sensibilidad.

¹Tesista

² Director

ABSTRACT

The advantages of the semiclosed greenhouses are water and energy savings as well as the increase in yield and product quality. However, one of the challenges in this system is the humidity control. This research uses the information from a semiclosed greenhouse with tomato crop, located at Institute of Horticulture at Humboldt University of Berlin. Two cases are analyzed: 1) A completely closed greenhouse where only the processes of transpiration and condensation are present; 2) When the vents are open and the ventilation process is included in the water vapor mass balance. For the first case, only calibration was necessary, the two parameters that change the most were the boundary layer resistance and the extinction radiation coefficient. In the second model, a sensitivity analysis before calibration, with latent heat of vaporization and radiation extinction coefficient being the most sensible parameters, was performed. In general, the two models simulate the humidity behavior in an acceptable way.

Keywords: Transpiration, condensation, ventilation, calibration, sensitivity analysis.

¹Thesis author

² Thesis director

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
DATOS BIOGRÁFICOS DEL AUTOR	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VI
ÍNDICE GENERAL.....	VII
ÍNDICE DE CUADROS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1. Procesos que afectan la humedad en el invernadero.....	5
2.1.1. Transpiración.....	6
2.1.2. Condensación.....	8
2.1.3. Ventilación.....	9
2.2. Elementos que influyen en la modelación de humedad.....	10
2.2.1. Radiación neta.....	10
2.2.2. Resistencia estomática.....	11
2.2.3. Resistencia de la capa límite de la hoja	13
2.2.4. Intercepción de luz	15
2.2.5. Transmisividad de la luz	17
2.3. Modelación de la humedad en invernaderos	18

2.3.1.	Modelación de la transpiración	23
2.3.2.	Modelación de condensación	24
2.3.3.	Modelación de la ventilación	26
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
3.1.	Caso de estudio.....	31
3.2.	Modelo 1: comportamiento de la humedad del aire en el invernadero completamente cerrado.....	34
3.2.1.	Supuestos del modelo	34
3.2.2.	Estados, entradas de control y entradas externas.....	35
3.2.3.	Modelado de la humedad del aire	35
3.2.4.	Modelado de la transpiración	35
3.2.5.	Modelado de la condensación.....	38
3.2.6.	Medidas de ajuste	39
3.2.7.	Calibración	42
3.3.	Modelo 2: Comportamiento de la humedad del aire en el invernadero semicerrado cuando las ventanas se encuentran abiertas	43
3.3.1.	Supuestos del modelo	43
3.3.2.	Modelado de la humedad del aire	44
3.3.3.	Modelado de la ventilación	44
3.3.4.	Análisis de sensibilidad	47
4.	RESULTADOS Y DISCUSION	49
4.1.	Modelo 1: comportamiento de la humedad del aire en Invernadero cerrado	49

4.2. Modelo 2: comportamiento de la humedad del aire en el invernadero semicerrado cuando las ventanas están abiertas	57
CONCLUSIONES	68
APÉNDICE.....	81
Apéndice A. NOTACIÓN	81
Apéndice B. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO 1 EN MATLAB (PROGRAMA PRINCIPAL) PARA LA SIMULACIÓN DE LA HUMEDAD EN UN INVERNADERO CERRADO	83
Apéndice C. IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO 1 EN MATLAB.....	85
Apéndice D. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO 2 EN MATLAB (PROGRAMA PRINCIPAL) PARA LA SIMULACIÓN DE LA HUMEDAD EN UN INVERNADERO SEMI-CERRADO	88
Apéndice E. ECUACIONES DE SENSIBILIDAD PARA EL MODELO 2	90
Apéndice F. IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO 2 EN MATLAB.....	103
Apéndice G. IMPLEMENTACIÓN DE LA VENTILACIÓN ESPECÍFICA EN MATLAB PARA EL APARTADO DE VENTILACION DEL MODELO 2	107

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Valores típicos de la resistencia estomática mínima; la resistencia de la capa límite de la hoja y el LAI de los cultivos en un invernadero holandés (Bontsema, et al. 2007).....	14
Cuadro 2. Límite inferior y superior para cada parámetro.....	51
Cuadro 3. Índices estadísticos para el mejor rango de variación de los parámetros y valor óptimo de los mismos.....	52
Cuadro 4. Resultados de la calibración del Modelo 1.	54
Cuadro 5. Valores de los índices de sensibilidad para los parámetros λ , k , $L1$, nv , As , $L2$, rb , γ , τ	62
Cuadro 6. Resultados de la calibración del Modelo 2.	63
Cuadro 7. Medidas de ajuste y valores óptimos de los parámetros después de la calibración del modelo 2.	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática de los flujos de vapor de agua, donde χ es la concentración de vapor ($\text{gm} - 3$), y h es la altura media del invernadero (m).	5
Figura 2. Representación esquemática de un medio turbio.....	11
Figura 3. Variación de la transmisividad en función del ángulo de incidencia en los materiales de polietileno térmico y tricapa de un invernadero.....	18
Figura 4. Invernadero semicerrado ubicado en la Universidad Humboldt de Berlín.	32
Figura 5. Tubos corrugados de aluminio colocados bajo el techo del invernadero.....	32
Figura 6. Humedad absoluta y relativa medidas (azul) y estimadas (verde) con parámetros reportados en la literatura (15 de febrero al 29 de abril del 2012). 50	
Figura 7. Humedad absoluta y relativa medidas (azul) y estimadas (verde) con parámetros óptimos después de la calibración del modelo (15 de febrero al 29 de abril del 2012).	53
Figura 8. Humedad absoluta medida (azul) y estimada (verde) antes (arriba) y después de la calibración (abajo) del modelo (15 y 16 de febrero del 2012)....	55

Figura 9. Humedad relativa medida (azul) y estimada (verde) antes (arriba) y después (abajo) de la calibración del modelo (15 y 16 de febrero del 2012)....	56
Figura 10. Humedad absoluta y relativa medidas (azul) y estimadas (verde) con parámetros reportados en la literatura del modelo 2 (9 de marzo al 4 de julio del 2012).....	58
Figura 11. Sensibilidad relativa de la humedad absoluta (izquierda) y sensibilidad relativa de la humedad relativa (derecha) respecto a los parámetros $r_b, \lambda, k, \tau, A_s$	61
Figura 12. Sensibilidad relativa de la humedad absoluta (izquierda) y sensibilidad relativa de la humedad relativa (derecha) respecto a los parámetros $n_v, L_1, A_s, L_2, \gamma$	61
Figura 13. Humedad absoluta y relativa medidas (azul) y estimadas (verde) con parámetros óptimos después de la calibración del modelo 2 (9 de marzo al 4 de julio del 2012).....	64
Figura 14. Humedad absoluta antes y después de la calibración (considerando 7 días del mes de mayo del 2012).	66
Figura 15. Humedad relativa antes y después de la calibración (considerando 7 días del mes de mayo del 2012).	67

1. INTRODUCCIÓN

Durante la última década ha habido un creciente interés en invernaderos cerrados o semi-cerrados, ya que reducen de manera considerable el consumo de agua y energía, e incrementan los rendimientos y calidad de los productos.

Los invernaderos semicerrados permiten reciclar y almacenar el calor reduciendo la cantidad de combustible requerido para la calefacción, mejorando la eficiencia en el enriquecimiento del CO₂, el ahorro de energía, previenen la invasión de insectos, reduciendo el uso de plaguicidas. En este tipo de tecnología se puede conservar y reciclar el agua utilizada, ya sea a través del riego o a través del sistema de enfriamiento, se puede tener un mejor control del clima que mejore la calidad del producto. Quizás la principal ventaja de usar invernaderos semicerrados es la de añadir seguridad y estabilidad a la producción bajo invernadero, ventaja que sin duda contribuye a elevar la rentabilidad en las condiciones actuales del mercado.

La acumulación de calor en el invernadero semicerrado proveniente de la radiación solar se puede recuperar y almacenar. En Holanda se utilizan intercambiadores de calor y acuífero, reportándose un incremento en la producción de jitomate de 22 %, reducción del uso de químicos en 80% y un ahorro del 50% de agua de riego y se mejora hasta en un 50% la eficiencia en el uso de energía (Namesny, 2009).

Todos los beneficios mencionados contribuyen notablemente a la sustentabilidad en la producción de flores y hortalizas.

En regiones mediterráneas se han realizado algunos proyectos de invernaderos cerrados, tales como el proyecto de Watergy (Buchholz, et al., 2006; Speetjens, 2008). Estos invernaderos no solo son útiles para reducir el uso de combustibles fósiles sino también para ahorrar agua, aspecto que hace ver a los invernaderos cerrados como un concepto atractivo. El principal elemento innovador del invernadero Watergy es una torre de enfriamiento en el centro de la estructura, donde el aire caliente, a lo largo del día, se eleva desde la zona del cultivo hasta la torre de enfriamiento donde es humedecido y refrigerado por unos rociadores de agua. Durante las evaluaciones de primavera, las temperaturas diurnas variaron entre 20°C y 35°C, mientras que la humedad relativa osciló entre 80% y 90%. Se logró una reducción del 75% en el consumo de agua, y no fue necesario usar energías adicionales ni pesticidas, tampoco se observó ningún problema por enfermedades fúngicas. (Buchholz, et al., 2006).

Los principales beneficios de invernaderos semicerrados es el aumento de la eficiencia en el enriquecimiento de dióxido de carbono, menor uso de plaguicidas, y ahorro de energía. Esta modalidad de invernaderos puede estar equipado con un sistema refrigeración, mediante conductos de aire debajo de los canalones con el que se obtiene un gradiente de temperatura vertical con aire frío cerca del sistema de raíces y el aire caliente cerca la parte superior de la cubierta. La distribución de la temperatura horizontal es bastante homogénea durante el enfriamiento con los conductos de aire. Por otra parte, los invernaderos semicerrados dependen por completo de los sistemas de

refrigeración para su operación en verano, pudiendo generar grandes costos por enfriamiento según la capacidad del sistema, además de complejidad o costo de las instalaciones.

En cuanto a la calefacción, se considera el almacenamiento térmico activo en acuíferos naturales o artificiales, esto se aplica cada vez más en invernaderos holandeses cerrados o semicerrados. Mediante una bomba de calor la energía térmica se extrae del acuífero y se cede al aire del invernadero cuando es preciso calentarlo. Dicho almacenaje podría atenuar la oscilación térmica del día y la noche en invernaderos sin calefacción y prolongar la estación de crecimiento (Montero, et al., 2008).

Con el uso de un modelo general, Vanthoor y colaboradores (Montero, et al., 2008) demostraron que al aumentar el almacenaje térmico natural del suelo, también aumenta la productividad cuando la ventilación es insuficiente (clima mediterráneo en verano). Sin embargo, también se demostró que el efecto puede ser opuesto durante el invierno en que el almacenaje puede disminuir la temperatura diurna.

Se ha comentado que uno de los problemas asociados al cierre total o parcial del invernadero es el exceso de humedad, causante de pérdidas en la calidad y la cantidad de los productos hortícolas (Baptista, 2007). Sería deseable que el invernadero fuera capaz de recoger la condensación del techo para evitar el goteo sobre el cultivo. La gran mayoría de las estructuras de invernaderos no logran este objetivo, aunque existen proyectos de investigación y desarrollo en curso que tratan de generar invernaderos innovadores con gran pendiente en el

techo y naves más estrechas; de esta manera la condensación escurre por gravedad hacia los canales de recogida.

Sin duda alguna, es de vital importancia controlar la humedad en invernaderos cerrados o semicerrados, ya que no todos los cultivos pueden crecer bajo regímenes de humedad alta. Los invernaderos deben proporcionar un mejor control de humedad para evitar que las enfermedades producidas por hongos ocasionen pérdidas en la producción y en la calidad de los cultivos.

De acuerdo con lo anterior, el presente trabajo se desarrolló utilizando información de un invernadero semicerrado ubicado en el Instituto de Horticultura de la Universidad Humboldt de Berlín, Alemania y tiene como objetivo analizar el comportamiento de la humedad en el invernadero semicerrado con cultivo de jitomate mediante modelos de simulación a fin de controlar y predecir la humedad dentro del mismo. Se consideran dos casos:

- 1) Modelación de la humedad con el invernadero completamente cerrado.
- 2) Modelación de la humedad cuando se permite que exista ventilación natural.
- 3) Hacer el análisis de sensibilidad y calibración de los parámetros en ambos modelos.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Procesos que afectan la humedad en el invernadero

Dentro de un invernadero se llevan a cabo diferentes procesos dinámicos que determinan la humedad absoluta y relativa y que se pueden representar en la Figura 1.

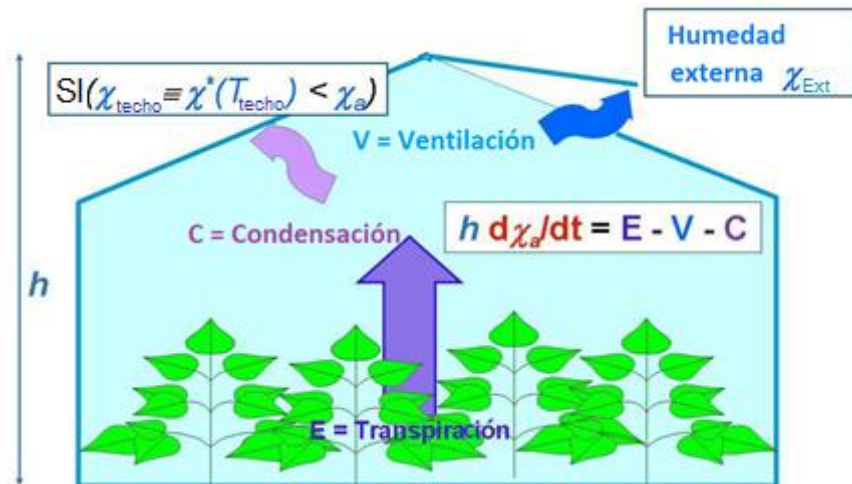


Figura 1. Representación esquemática de los flujos de vapor de agua, donde χ es la concentración de vapor (gm^{-3}), y h es la altura media del invernadero (m).

En términos generales, en el balance dinámico de la masa de agua intervienen tres flujos de vapor de agua, la transpiración del cultivo (E), la condensación (C) y la ventilación (V) en $\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ y que a continuación se describen.

2.1.1. Transpiración

La transpiración es el proceso mediante el cual el agua se evapora de la superficie de las células a los espacios de aire dentro de la hoja, y se difunde al exterior a través de los estomas (Allen et al., 2006). Mediante el proceso de transpiración el cultivo genera su propio microclima que a su vez afecta la transpiración, dándose la retroalimentación entre el cultivo y el microclima (Stanhill et al., 1974).

Las necesidades de agua de los cultivos bajo invernadero son menores que los cultivos a campo abierto. En regiones con alta radiación solar, un invernadero de plástico puede reducir el uso del agua en un cultivo en 30% (FAO, 1991). Sin embargo, en Almería, España, se reduce el uso del agua entre 40-50% debido a la disminución en la radiación solar y el viento (Fernández y Camacho, 2005). Por otro lado, Antón et al. (2003) mencionan que la evapotranspiración en invernadero se reduce un 70% respecto a la del aire libre.

Fernández y Camacho (2005) reportan que la producción de jitomate en Almería, España, requiere de $27\text{m}^3\text{t}^{-1}$ (37 kg m^{-3}), en comparación con la producción a campo abierto, que usa de 50 a $60\text{ m}^3\text{t}^{-1}$ ($16\text{-}20\text{ kg m}^{-3}$); las cifras anteriores muestran un notable incremento en la productividad del agua al pasar de campo abierto a invernaderos.

Aunque los procesos que conducen a la acumulación de peso fresco aún no se entienden completamente, se sabe que la transpiración (junto con las condiciones de la zona de la raíz) influye mucho en el crecimiento de la planta (Li et al., 2001)

En una serie de experimentos se ha podido controlar la transpiración del tomate en invernaderos semi-comerciales a través de un algoritmo desarrollado por Stanghellini y Van Meurs (1992), y han demostrado que esto equivale a controlar el rendimiento fresco de la planta mediante la variación de las condiciones en que se encuentran en la raíz.

Tanto en condiciones de transpiración muy bajas (sin absorción de calcio) como en muy altas (flujo preferencial a las hojas), se puede tener deficiencia de calcio en el cultivo, lo cual produce pudrición apical del fruto.

El conocimiento actual no es suficiente para establecer la tasa de transpiración "óptima" bajo diferentes condiciones. Existen muchas razones para que los agricultores quieran monitorear (y, posiblemente, controlar) la transpiración:

- 1.- Prevención de condiciones extremas (tasas muy altas o muy bajas de transpiración).
- 2.- Dada la importancia de las condiciones de zona raíz para la acumulación de peso fresco, surge la necesidad de adecuar el suministro de agua para cambiar las tasas de transpiración.
- 3.- Para tener una idea de los efectos de las acciones de control climático sobre la tasa de transpiración, tales como ventilación y calefacción.
- 4.- Para discriminar entre la absorción de agua (que es también el crecimiento en peso fresco) y la transpiración.

2.1.2. Condensación

Las plantas tienen la capacidad de cambiar la radiación solar a calor latente (producción de vapor de agua por la transpiración de las plantas). Esto hace que disminuya la temperatura de la hoja; el follaje funciona como una superficie de enfriamiento del aire del invernadero o como un absolvedor de calor (Salazar et al., 2014).

Cuando la temperatura, ya sea en la cubierta del invernadero o en alguna superficie dentro del invernadero, se encuentra por debajo de la temperatura de punto de rocío (temperatura a la cual el vapor de agua presente se condensa) ocurre la condensación, la cual disminuye el contenido de humedad y, por otro lado, libera energía. Si el vapor se condensa en un intercambiador de calor, el calor latente se convierte nuevamente en calor sensible (Salazar et al., 2014).

Dentro de un invernadero, durante el día, la humedad relativa (HR) baja al subir la temperatura, aunque la humedad absoluta se haya incrementado con la transpiración (Berninger, 1989). De noche, al enfriarse el invernadero, la HR crece pudiendo alcanzar la saturación y entonces se produce la condensación sobre las superficies del invernadero, empezando por la parte más fría del invernadero.

2.1.3. Ventilación

El aire que rodea a las plantas es uno de los factores más importantes ya que éstas respiran y realizan sus funciones fisiológicas en función de esta actividad. Es por ello que la ventilación dentro de un invernadero es uno de los factores clave a controlar (Cervantes, 2002).

El aislamiento del material de cubierta y laterales del invernadero implica una gran reducción del viento respecto al exterior (Day et al., 1999). Esta reducción del viento tiene una gran repercusión sobre la fisiología del cultivo y sobre el microclima del invernadero. Los intercambios de aire con el exterior dependen mucho del viento exterior (Castilla, 2007).

La aireación de los invernaderos se justifica por tres razones (Castilla, 2007):

- Evitar el calentamiento excesivo de día.
- Asegurar niveles mínimos de CO₂.
- Controlar la higrometría.

El movimiento del aire en el invernadero, además de evitar la estratificación de temperaturas (sobre todo cuando se emplean sistemas de calefacción por aire caliente), tiene gran importancia sobre el cultivo, afectando la fotosíntesis, la transpiración y al uso del agua y, por tanto, el crecimiento y la producción. La ausencia de movimiento de aire es negativa para la productividad del cultivo.

Estudios realizados por Baptista, et al. (2001) confirmaron que la ventilación es una de las herramientas más importantes para controlar el clima del invernadero.

2.2. Elementos que influyen en la modelación de humedad

Para la modelación de la humedad se requiere de componentes aerodinámicos, con lo cual la humedad dentro de un invernadero resulta una función de la radiación solar, temperatura del aire, presión de vapor y velocidad del viento. Estas condiciones climatológicas a su vez dependen de la resistencia aerodinámica, estomática, intercepción de la luz y transmisividad de la luz.

A continuación se describen algunas de las variables y parámetros utilizados en la los modelos.

2.2.1. Radiación neta

En la mayoría de las condiciones ambientales, la contribución de la radiación a la transpiración del cultivo puede estimarse solamente a través de la radiación solar (Baille et al., 1994).

Ross (1975), realizó un modelo de medio turbio de una población de plantas, donde la transmisión de la radiación solar, I_{solar} se describe de manera similar a lo que ocurre en un medio semi-transparente:

$$\frac{I_{\text{solar,abajo}}}{I_{\text{solar,arriba}}} = \exp(-kd) \quad (2.1)$$

El índice de área foliar (LAI) tiene la función del espesor d , del medio. El coeficiente de extinción k está en relación con la inclinación de las hojas. Una representación del medio turbio se representa en la Figura 2.

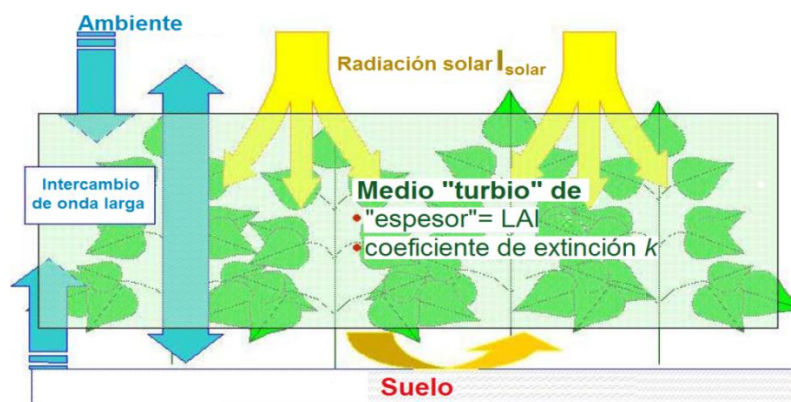


Figura 2. Representación esquemática de un medio turbio.

Stanghellini (1987), amplió la analogía de Ross (1975), para tener en cuenta la reflexión tanto del dosel como de la superficie del suelo, que es relevante para un cultivo en filas, como el caso de invernaderos. En su trabajo determinó experimentalmente los coeficientes relevantes para un cultivo de tomate en un suelo con mantillo blanco. El modelo final de Stanghellini se puede simplificar como:

$$R_n = 0.86(1 - \exp(-0.7LAI))I_s \quad (2.2)$$

Donde R_n (Wm^{-2}) es la radiación neta y I_s es la radiación global en la parte superior del dosel. Dado que generalmente la radiación global se mide fuera del invernadero, este coeficiente se reduce entre el 65 y el 70% debido a la transmisibilidad del invernadero.

2.2.2. Resistencia estomática

La resistencia estomática está determinada por el grado de apertura de estoma, de la densidad de estomas y su tamaño, es la resistencia que limita la transpiración. De tal modo que la resistencia estomática es la resistencia asociada a la difusión a través de los poros estomáticos (Taiz y Zeiger, 2006).

Con estomas cerrados la resistencia estomática es mayor, en el caso contrario cuando los estomas están abiertos la resistencia estomática es menor.

La resistencia de los estomas cambia mucho durante un día, en particular en respuesta a la luz, y presenta valores elevados durante la noche (estomas cerrados), típicamente 1000 ms^{-1} o superiores, y disminuye con la luz a un valor mínimo de cultivos específicos (Jarvis, 1976).

Factores tales como la escasez de agua, temperaturas altas o bajas pueden causar el cierre (parcial) de la cavidad estomática, de modo que el valor mínimo quizás nunca sea alcanzado.

Jarvis (1976) propuso un modelo para la resistencia estomática de la forma:

$$r_s = r_{\min} f_1(I_s) f_2(T) f_3(\text{déficit de presión de vapor}) f_4(\text{CO}_2) \quad (2.3)$$

Donde $r_{\min}$ es un valor mínimo específico del cultivo de la resistencia de los estomas (una lista de valores para muchos cultivos se puede encontrar en [Körner, 1979]) y las funciones f_{1-4} (siempre mayor que 1) describen el incremento de la resistencia de los estomas a la dependencia de la luz, temperatura, concentración de humedad y dióxido de carbono.

Utilizando el modelo anterior, Stanghellini (1987) determina experimentalmente los parámetros de las funciones f_{1-4} para un cultivo de tomate. Encontró sólo un efecto muy débil de la concentración de dióxido de carbono del aire, un hallazgo (para las concentraciones de CO_2 por encima de 350 ppm) que se confirmó a través de mediciones directas de la resistencia de los estomas en una cámara de la hoja (Stanghellini y Bunce, 1993).

Adicionalmente Nederhoff (1994), encontró que la resistencia de los estomas de tomate aumentó sólo un 27%, para el aumento de la concentración de CO₂ entre 200 y 1000 ppm.

Jolliet y Bailey (1992) analizaron el rendimiento de una serie de modelos en la estimación de la transpiración de los cultivos de tomate en invernadero y concluyeron que el modelo de Stanghellini (1987) fue el mejor.

Stanghellini propone la siguiente expresión para la resistencia estomática, r_s (sm⁻¹):

$$r_s = 82 \frac{\frac{R_n}{2LAI} + 4.30}{\frac{R_n}{2LAI} + 0.54} (1 + 0.023(T_a - 24.5)^2) \quad (2.4)$$

Dónde: R_n es la radiación neta de los cultivos (Wm⁻²), LAI es el índice del área foliar (adimensional) y T_a es la temperatura del aire al interior del invernadero en °C.

2.2.3. Resistencia de la capa límite de la hoja

La capa límite es una delgada capa de aire inmóvil alrededor de la hoja. Para que la transpiración ocurra, el vapor de agua que sale de los estomas debe difundirse a través de esta capa de aire estático para alcanzar la atmósfera, donde el vapor de agua será removido por el aire en movimiento. Entre más gruesa sea la capa límite, menores serán las tasas de transpiración.

Las plantas pueden modificar el grosor de la capa límite alrededor de las hojas mediante diferentes características estructurales. Las hojas que poseen vellosoidad o pubescencia presentarán capas límite más gruesas; la vellosoidad resta movilidad al aire e incrementa la capa límite, disminuyendo las tasas de transpiración.

Según lo anterior la resistencia de la capa límite es proporcional al grosor de la capa de aire inmóvil en contacto con la superficie foliar (Azcón, 2000).

Stanghellini (1987) determina los parámetros de un modelo para la resistencia aerodinámica o resistencia de la capa límite, basado tanto en la velocidad del viento como en las dimensiones de la hoja. También mostró que las variaciones pequeñas en el movimiento del aire en un invernadero aseguran que la resistencia de la capa límite sea bastante constante.

La resistencia de la capa límite (r_b) de las hojas dentro del invernadero puede ser descrito por un modelo para los regímenes mixtos de convección (Stanghellini et al., 1993). Además, la tasa de transpiración es bastante sensible a la resistencia de la capa límite, de manera que existe una pérdida de precisión en el uso de un r_b constante.

Los valores típicos para un invernadero estándar (sin movimiento de aire forzado) de las resistencias aerodinámicas se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Valores típicos de la resistencia estomática mínima; la resistencia de la capa límite de la hoja y el LAI de los cultivos en un invernadero holandés (Bontsema, et al. 2007).

Cultivo	r_s (sm^{-1})	r_b (sm^{-1})	LAI
Tomate	200	200	3
Pimiento dulce	200	300	4
Pepino	100	400	5
Berenjena	100	350	4

2.2.4. Intercepción de luz

La producción de cultivos a menudo muestra una relación lineal a la radiación acumulada (Cockshull, 1988) o, más generalmente, a la radiación interceptada acumulativa (Arkebauer et al., 1994; Monteith, 1994).

En consecuencia, los modelos de crecimiento de los cultivos se han desarrollado en relación a la producción de biomasa según la radiación que estas intersectan (Spitters, 1987; Morisot, 1996).

La absorción de la radiación puede ser modelada utilizando el principio de que la absorción de la radiación aumenta a medida que el área de la hoja es mayor. Este supuesto conduce a la extinción exponencial de la radiación, y es equivalente a la ley de Lambert-Beer (Monsi et al., 1953):

$$I/I_0 = e^{-k \cdot L} \quad (2.5)$$

donde k representa el coeficiente de extinción, I e I_0 son el nivel de radiación en el dosel a una cierta profundidad L (expresado en el LAI suprayacente) y en la profundidad 0 por encima del dosel, respectivamente. Los valores típicos para k están en el intervalo de 0,5 a 0,8 (Carranza et al., 2008).

Como la extinción de la luz depende tanto de la geometría de la radiación y de la geometría de posición y orientación de la hoja, se han desarrollado modelos más detallados (De Wit, 1965; Ross, 1981). En cualquier ubicación dentro del follaje de la planta, la radiación se compone de las contribuciones de todas las direcciones. Estas diferentes contribuciones se pueden agrupar en función de su dirección zonal y el azimut. El ángulo de incidencia de la radiación sobre una hoja dependerá de la orientación de la hoja y la dirección de radiación.

Si las posiciones de las hojas son al azar, cada nueva unidad de área de la hoja interceptará la misma fracción y el perfil de radiación resultante seguirá la función exponencial de la ecuación 2.5. Para hojas horizontales, la fracción de la radiación interceptada por cualquier hoja será proporcional al área de la hoja, independiente de la dirección de la radiación, entonces todo el perfil se caracteriza por una sola función exponencial, con un coeficiente de extinción $k=1$. En general, k será diferente para cada dirección de radiación, y el perfil total será una adición de muchos diferentes perfiles exponenciales. Esto significa que el perfil resultante de la radiación sólo es aproximadamente exponencial, aunque la función exponencial será la aproximación más práctica (Goudriaan, 1988; Heuvelink, 1996).

Debido a que la luz directa y difusa tienen diferentes perfiles de extinción en el dosel y debido a la saturación de la luz de la fotosíntesis, el rayo solar (flujo directo) debe ser distinguido del resto de la radiación entrante (flujo difuso), de manera que la radiación se divide en al menos estos dos componentes (Spitters, 1986).

Es posible subdividir el flujo difuso de acuerdo con un segmento zonal (Goudriaan y Van Laar, 1994), pero si esto no se hace el coeficiente de extinción para el flujo difuso puede suponerse que es de aproximadamente 0.7 en promedio.

La simulación numérica detallada de la absorción de la radiación ($I_{\text{abs,L}}$: radiación absorbida por el LAI suprayacente) se aproxima a:

$$I_{\text{abs,L}} = (1 - \rho)I_0(1 - e^{-k*L}) \quad (2.6)$$

es precisa y nunca se desvía más de 1 o 2% a partir de una simulación detallada con hojas iluminadas y hojas sombreadas (Marcelis et al., 1998).

2.2.5. Transmisividad de la luz

El parámetro que indica el comportamiento de un invernadero respecto a la radiación solar es la transmitancia o eficiencia térmica (Zabeltitz, 1998; Giacomelli, 1998; Boulard y Wang, 2000), la cual es definida como la relación entre la intensidad de la radiación transmitida debajo de la superficie de la cubierta dentro de un determinado ancho de banda y la radiación incidente sobre la superficie dentro del mismo ancho de banda (Zabeltitz, 1998).

Se ha observado que dicha capacidad está en función de parámetros tales como: condiciones climáticas, posición del sol, la geometría de la cubierta del invernadero, orientación del invernadero, características radiométricas del tipo de cubierta, entre otras (Bot, 1983; Hernández et al., 2003).

Es de esperarse que estos parámetros difieran dependiendo de la situación geográfica, tipo y manejo del invernadero, sin embargo, la información que de ello se tiene es escasa (Hernández et al., 2003), más aún si se consideran invernaderos de baja tecnología (Giacomelli, 1998).

En cuanto al ángulo de incidencia, la transmitancia a la radiación solar directa es mayor cuando más perpendicular incida sobre la cubierta del invernadero (Bot, 1983). En la Figura 3 se muestra la transmitancia para dos tipos de

materiales típicos para invernadero (polietileno térmico 88 % y tricapa 92 %) y su ángulo de incidencia (Montero et al., 2001), en el caso de la transmitancia para un invernadero de cristal, el valor es de 0.7 (Van Beveren et al., 2014).

La transmitancia global media debe integrarse como un valor medio en todo el invernadero, dada la variabilidad de la radiación a que están sometidos los diversos puntos.

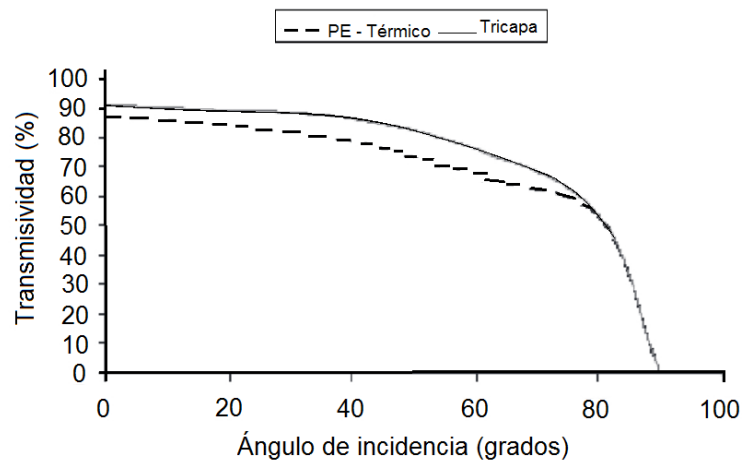


Figura 3. Variación de la transmisividad en función del ángulo de incidencia en los materiales de polietileno térmico y tricapa de un invernadero.

2.3. Modelación de la humedad en invernaderos

Se han desarrollado diferentes modelos para tratar de explicar el comportamiento de la humedad en un invernadero. Stanghellini (1987) analizó algunos aspectos físicos del clima de un invernadero, para mostrar las interrelaciones entre microclima y la humedad que rodea al cultivo. Mostró que el balance de energía de un cultivo en invernadero provee una base sólida para cuantificar el impacto del microclima en la humedad e identificar los valores límite en el manejo climático, dado el comportamiento termodinámico del dosel.

Antes de establecer, en términos matemáticos, las relaciones con el microclima, Stanghellini realizó un experimento en el que se definieron submodelos para la transferencia de calor del follaje, para la transferencia de radiación dentro del dosel y para la resistencia del dosel a la transferencia de vapor. Estos submodelos se incorporaron en una ecuación, para obtener la temperatura y transpiración de un cultivo en invernadero. Las estimaciones obtenidas reprodujeron con buena precisión la temperatura y transpiración de un cultivo de jitomate en invernadero, respecto a las mediciones hechas a intervalos de pocos minutos.

El modelo de Stanghellini se tomó como base para el desarrollo de otros modelos, por ejemplo, Jolliet y Bailey (1992), a través de medir el efecto de algunas variables meteorológicas (velocidad del viento, déficit de presión de vapor, radiación solar y concentración de CO_2) en la transpiración de un cultivo de jitomate y mediante la evaluación de cinco modelos de transpiración, estudiaron el control del clima en un invernadero. Respecto al efecto de las variables meteorológicas, encontraron que en un cultivo joven (índice de área foliar, $\text{LAI} = 0.56$), un incremento en la radiación solar de $1 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ provocó un incremento en la transpiración de 0.09 mm d^{-1} ; un incremento en el déficit de presión de vapor de 0.1 kPa (disminución de 4% en la humedad relativa a 20°C) causó un incremento de solo 0.013 mm d^{-1} en la transpiración, y una velocidad del viento de 1 m s^{-1} generó un incremento de 0.13 mm d^{-1} en la transpiración. Para un cultivo desarrollado ($\text{LAI} = 2.94$) reportaron que la radiación tuvo un efecto un poco mayor que para un cultivo joven (un

incremento de 1 MJm^{-2} provoco un incremento de 0.14 mm d^{-1} en la transpiración), pero el efecto de déficit de presión de vapor fue mucho mayor (un incremento de 0.1 kPa en el déficit de presión de vapor genero un incremento de 0.24 mm d^{-1} en la transpiración) que para un cultivo joven. Concluyeron que la tasa de transpiración se incrementó linealmente con la radiación solar, el déficit de presión de vapor y la velocidad del viento; la temperatura del aire, la concentración de CO_2 y la temperatura de la tubería de calefacción no tuvieron efecto significativo en la tasa de transpiración.

Dos años después Joliet (1994) propuso el modelo HORTITRANS, para predecir humedad del aire y transpiración del cultivo como funciones de las condiciones meteorológicas fuera del invernadero, con el objetivo de desarrollar algunas estrategias de control óptimo de humedad en invernaderos. Este modelo tiene una estructura sencilla y concisa, pero al mismo tiempo incluye los procesos de transpiración, condensación, ventilación y humidificación o deshumidificación. El modelo permite calcular la presión de vapor interna como una función de las condiciones ambientales externas y de las características del invernadero. La condensación en la cubierta se calcula primero para el aire interior a saturación y luego se corrige con un factor que considera la realimentación entre humedad interna y temperatura de la cubierta. Dado que todos los términos del modelo son lineales, es posible determinar la cantidad de agua y energía añadida o extraída del aire dentro del invernadero, para alcanzar un umbral de humedad o transpiración.

A continuación se describe el modelo HORTITRANS, en el cual la transpiración se expresa como:

$$E_t = \frac{\alpha}{\lambda} R_i + \frac{h_t}{\lambda \gamma} (e_{si} - e_i) \quad (2.7)$$

donde E_t es la transpiración de la planta ($\text{mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$), R_i es la radiación solar incidente en el interior del invernadero (Wm^{-2}), e_{si} es la presión del vapor a saturación dentro del invernadero (Pa) y e_i es la presión de vapor dentro del invernadero (Pa). El parámetro " α " se calcula como una función del índice de área foliar (LAI, por sus siglas en inglés). h_t es el coeficiente de transmisión de calor sensible ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) y se calcula en función de la LAI y R_i . También, la transpiración está influenciada por λ y γ , donde λ es el calor latente de vaporización del agua (MJkg^{-1}) y γ es la constante psicrométrica (66 PaK^{-1}).

La ventilación se describe en la siguiente ecuación:

$$E_v = \frac{h_v}{\lambda \gamma} (e_i - e_o) \quad (2.8)$$

La ecuación 2.8 indica que E_v , la pérdida de vapor de agua a través de la ventilación ($\text{mgm}^{-2}\text{s}^{-1}$), depende de la diferencia en la presión de vapor de agua entre el interior y el ambiente exterior, $e_i - e_o$ (Pa).

El coeficiente de transferencia de calor sensible debido a la renovación de aire (h_v) ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) se calcula con la ecuación 2.9:

$$h_v = \rho_a C_{pa} \frac{q}{A} \quad (2.9)$$

Donde ρ_a es la densidad del aire (kgm^{-3}), C_{pa} es la capacidad de calor de aire ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$); q es la tasa de flujo de aire (m^3s^{-1}) y A es el área de suelo del invernadero (m^2).

La ecuación que se establece para la condensación en el Modelo HORTITRANS es la siguiente:

$$E_c = \frac{h_c}{\lambda \gamma} (e_i - e_{sx}) - \frac{h_{ci}}{\lambda \gamma} (e_{si} - e_i) \quad (2.10)$$

Donde E_c es la condensación dentro de un invernadero ($\text{mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$), e_i es la presión de vapor en el interior del invernadero (Pa), e_{sx} es la presión de vapor a saturación en la superficie interior de la cubierta (Pa) y e_{si} es la presión de saturación de vapor en el interior el invernadero (Pa). h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) y h_{ci} es el coeficiente de transferencia de calor de la cubierta en la interacción con la humedad del interior ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$).

En base a los procesos que se describieron anteriormente, el modelo predijo con un error máximo de 8%, la presión de vapor, humedad relativa, transpiración y la condensación dentro del invernadero, cuando se cotejó con las mediciones hechas en dos cultivos de jitomate: uno joven y uno maduro. La modelación de la humedad del aire mostro que hay poca necesidad de deshumidificación en un invernadero con cubierta sencilla.

Por otro lado, Stanghellini y Jong (1995) describen el balance de vapor de agua en un invernadero partiendo de lo propuesto por Joliet (1994) en la siguiente ecuación:

$$h\dot{\chi}_a = E - C - V \quad (\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}) \quad (2.11)$$

Donde E es la evapotranspiración del cultivo, C es la eliminación de vapor a través de la condensación, V es la ventilación, h (m) es la relación entre el

volumen del invernadero a su área de terreno, es decir, la altura media del invernadero y χ_a es el contenido de vapor del aire dentro del invernadero.

A continuación se describe el proceso de modelación de cada uno de los términos de la ecuación 2.11.

2.3.1. Modelación de la transpiración

La transpiración se puede estimar con la ecuación de Penman-Monteith:

$$\lambda E = \frac{sR_n + (2LAI \rho_a C_p D)/r_b}{s + \gamma(1 + r_s/r_b)} \quad (2.12)$$

Donde $\lambda \cdot E$ (Wm^{-2}) es la densidad del flujo de calor latente por transpiración, E ($kgm^{-2}s^{-1}$) es la densidad de flujo de vapor, D (Pa) es el déficit de presión de vapor del aire, R_n (Wm^{-2}) es la radiación neta que absorbe el cultivo, LAI (adimensional) es el índice de área foliar, r_b (sm^{-1}) la resistencia aerodinámica, r_s (sm^{-1}) la resistencia de la hoja, γ (PaK^{-1}) es la constante psicrométrica termodinámica, s (PaK^{-1}) es la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación; λ (Jkg^{-1}) es el calor latente de evaporación del agua; C_p ($Jkg^{-1}K^{-1}$) es el calor específico del aire a presión constante, y ρ_a (kgm^{-3}) es la densidad del aire.

Stanghellini (1987) realizó una extensa evaluación del modelo Penman-Monteith para un cultivo de tomate en invernadero. El modelo de Stanghellini incluye términos de resistencia interna y externa así como un cálculo más complejo de la radiación solar y térmica, derivado a partir de características empíricas de absorción de radiación de onda corta y larga en un dosel de varias capas (Prenger et al., 2002).

Stanghellini y de Jong (1990) presentan la ecuación de Penman-Monteith en la siguiente forma:

$$E = \frac{\epsilon r_b R_n / \lambda + 2LAI(\chi_a^* - \chi_a)}{(1+\epsilon)r_b + r_s} \quad (\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}) \quad (2.13)$$

Donde ϵ es la tasa de cambio de contenido de calor latente respecto al contenido de calor sensible del aire, r_b y r_s son la resistencia de la capa límite de la hoja y estomática, respectivamente (sm^{-1}), R_n es la radiación neta disponible para el dosel (Wm^{-2}), λ es el calor latente de vaporización del agua (Jkg^{-1}), LAI es el índice de área foliar χ_a (kgm^{-3}) es el contenido de vapor del aire interior del invernadero y el superíndice * indica saturación.

Con el fin de preservar la analogía con una ecuación de transferencia, la ecuación 2.13 puede ser reescrita como sigue:

$$E = g_E(\chi_{\text{cultivo}} - \chi_a) \quad (\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}) \quad (2.14)$$

Donde χ_{cultivo} (gm^{-3}) es concentración de vapor de agua del aire en el cultivo y la conductancia de la transpiración, g_E , está dada por:

$$g_E = \frac{2LAI}{(1+\epsilon)r_b + r_s} \quad (\text{ms}^{-1}) \quad (2.15)$$

2.3.2. Modelación de condensación

La condensación existe dentro del invernadero siempre que la temperatura de cualquier superficie sea inferior a la temperatura del punto de rocío del aire. Por lo general, es la superficie interior de la cubierta uno de los lugares más fríos en el invernadero. Además, la condensación se llevará a cabo sólo si la concentración de vapor saturado χ^* (gm^{-3}) en la superficie de condensación es menor que la concentración de vapor del aire en el invernadero.

La condensación según Bontsema et al. (2007) se expresa, C ($\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$):

$$C = \text{MAX}[0, g_c(\chi_a - \chi^*(T_{\text{cub}}))] \quad (2.16)$$

Donde T_{cub} ($^{\circ}\text{C}$) es la temperatura de la cubierta, g_c es la conductancia de la condensación (m s^{-1}) y la función MAX devuelve un valor máximo de la condensación.

Una regla empírica general aplicada para la temperatura de la cobertura de vidrio en condiciones climáticas para Holanda (Bontsema, et al. 2007) es:

$$T_{\text{cub}} = \frac{2}{3}T_{\text{ext}} + \frac{1}{3}T_a \quad (2.17)$$

Donde T_{ext} y T_a son la temperatura del aire externo e interno del invernadero en $^{\circ}\text{C}$.

Por otro lado, la temperatura del intercambiador de calor T_{inter} ($^{\circ}\text{C}$) se calcula en base a las temperaturas medidas del agua en la entrada, T_{ae} y salida, T_{as} , ambas en $^{\circ}\text{C}$ y el factor de ponderación β como se muestra a continuación (Van Beveren et al., 2014):

$$T_{\text{inter}} = \beta T_{\text{ae}} + (1 - \beta)T_{\text{as}} \quad (2.18)$$

La condensación en el intercambiador de calor $\Phi_{\text{C,inter}}$ ($\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$), según Van Beveren et al. (2014) se define por la ecuación:

$$\Phi_{\text{C,inter}} = g_{\text{C,inter}}(\chi_{\text{inter}}^* - \chi_a) \quad (2.19)$$

Donde χ_a (gm^{-3}) es la humedad absoluta del aire en el interior del invernadero, la humedad a saturación en el intercambiador de calor χ_{inter}^* (gm^{-3}) está dada por la siguiente ecuación

$$\chi_{\text{inter}}^* = 5.5638e^{0.0572T_{\text{inter}}} \quad (2.20)$$

La conductancia de condensación para el intercambiador de calor $g_{C,inter}$ (ms^{-1}) se calcula en función a la temperatura del aire T_a y la temperatura del intercambiador de calor T_{inter}

$$g_{C,inter} = \max(0, p_{g_{C,inter}} (T_a - T_{inter})^{1/3}) \quad (2.21)$$

Donde el parámetro $p_{g_{C,inter}}$ que está relacionada con las propiedades de la superficie de condensación, tiene un valor de 0.25×10^3 ($m^\circ C^{-1/3} s^{-1}$), (Van Beveren et al., 2014).

2.3.3. Modelación de la ventilación

La cantidad de fluido a través de una ventana puede ser calculada a partir de las pérdidas de carga usando la ecuación de Bernoulli (Roy et al., 2002). La caída de presión ΔP (Pa) a través de la apertura es calculada por la ecuación:

$$\Delta P = \xi \rho u^2 \quad (2.22)$$

Donde ξ (-) es el coeficiente de caída de presión, ρ ($kg\ m^{-3}$) es la densidad del aire y u (ms^{-1}) es la velocidad de aire. La ventilación se puede modelar relacionando la caída de presión con la velocidad media del aire, ya que las diferencias de presión que producen flujos de ventilación pueden deberse a la diferencia de temperatura del aire interior y exterior, y también por el viento que genera diferencias de presión sobre el invernadero (Roy et al., 2002; Bailey, 2000; Kittas et al., 1997):

$$u = \frac{|\Delta P|}{|\Delta P|} C_d \left(\frac{2|\Delta P|}{\rho} \right)^{0.5} \quad (2.23)$$

Donde de acuerdo con Boulard y Baille (1995), el coeficiente de descarga C_d (adimensional) se define como:

$$C_d = \xi^{-0.5} \quad (2.24)$$

El efecto del viento tiene dos componentes, un componente dado por el promedio de la velocidad del viento y un efecto turbulento (Papadakis et al., 1996).

2.3.3.1. Efecto térmico de flotabilidad

El efecto térmico de flotabilidad es el resultado de la diferencia entre la temperatura externa e interna, la cual crea una distribución de presión entre y sobre las ventanas en dirección vertical (Pérez et al., 2006). Por ello, es posible considerar las ventanas cenitales como aperturas verticales. El nivel de referencia es la mitad de la apertura donde la presión de entrada y salida son iguales y no hay intercambio de aire. El modelo propuesto por Boulard et al. (1996) para estimar las tasas de ventilación natural en invernaderos usando solo ventanas cenitales, está basado en las dos fuerzas de la ventilación natural: fuerza de flotabilidad y fuerza del viento, descritas mediante la ecuación 2.25:

$$G = \frac{A_R}{2} C_d \left(2g \frac{\Delta T}{T} \frac{H}{4} + C_w V^2 \right)^{1/2} \quad (2.25)$$

Donde G ($m^3 s^{-1}$) es la tasa de ventilación, A_R (m^2) es el área de ventanas cenitales, H (m) es la altura de la ventana a partir del suelo, g (ms^{-2}) es la aceleración de la gravedad, ΔT (K^0) es la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del invernadero, T (K^0) es temperatura exterior, v (ms^{-1}) es la velocidad del viento a una altura de 8 m y C_w (-) es el coeficiente del efecto del viento.

El valor del coeficiente de descarga C_d depende de las características de las ventanas. Roy et al. (2002) presentan los valores para C_d reportados en la literatura, principalmente para ventanas de construcciones verticales continuas o de tipos de invernaderos. Comúnmente, los valores para el coeficiente de descarga C_d están entre 0.6 y 0.8 con un promedio de 0.66.

2.3.3.2. Efecto del viento

Las fuerzas debidas al efecto viento alrededor de una construcción crean un campo de presiones a las aperturas y por lo tanto, producen un flujo de aire a través de ellas. Estas presiones pueden ser positivas, cuando los flujos de aire entran a la construcción, o negativas (succión) cuando los flujos de aire salen.

De acuerdo con Bailey (2000) el coeficiente C_w corresponde a la influencia del viento sobre la tasa de ventilación y parece ser independiente de la superficie del invernadero pero es altamente dependiente de la dirección del viento. Sin embargo, Boulard y Baille (1995) mostraron que decrece significativamente cuando se incrementa la velocidad del viento. Roy et al. (2002) presentan los valores para C_w reportados en la literatura, principalmente para túneles de áreas muy pequeñas. Comúnmente los valores para este parámetro tienen un rango de entre 0.07 y 0.14. El modelo que considera el efecto del viento sobre las tasas de ventilación, ha sido propuesto por varios autores (Boulard y Baille, 1995; Papadakis et al., 1996; Kittas et al., 1996; Roy et al., 2002).

$$G = \frac{A_s}{2} C_d \sqrt{C_w} v \quad (2.26)$$

Dónde: A_s (m^2) es el área de ventilación.

2.3.3.3. Efecto combinado del viento y flotabilidad

En la ventilación natural de un invernadero están presentes tanto las fuerzas del viento como las de flotabilidad. En áreas donde el viento alcanza altas velocidades, este efecto es más importante que la diferencia de temperaturas pero domina el efecto de flotabilidad cuando el viento es más débil. Meneses y Raposo (1987) citado por Baptista et al. (1999) consideraron que, para velocidades del viento de $0.5-1.5 \text{ (m s}^{-1}\text{)}$, la diferencia de temperaturas domina el efecto del viento en invernaderos con aperturas localizadas en el techo y en las paredes laterales y para velocidades de $1.5 \text{ a } 2.5 \text{ (m s}^{-1}\text{)}$ el efecto es combinado. A velocidades más grandes, ocurre lo opuesto y la influencia térmica puede ser ignorada. Sin embargo, estas limitaciones dependen de la geometría del invernadero, la posición de las ventanas y la diferencia de temperaturas entre lo interior y el exterior. Cuando ambas fuerzas actúan juntas, Boulard y Baille (1995), Kittas et al. (1997), Roy et al. (2002), consideraron que el resultado del flujo de aire no es igual a la suma de los dos valores separados.

El flujo a través de cualquier apertura está dado por una suma vectorial:

$$G = \sqrt{G_w^2 + G_s^2} \quad (2.27)$$

Donde $G_w \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$ es el flujo debido al viento y $G_s \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$ es el flujo debido a las diferencias térmicas.

De acuerdo con Roy et al. (2002), la hipótesis de un complemento de flujo en lugar de diferencias de presión individuales conduce a un error del orden de 10% en la estimación del flujo combinado.

Kittas et al. (1997) propusieron un modelo que está compuesto del efecto de flotabilidad debido al efecto térmico (producido por la diferencia entre la temperatura del aire interior y exterior) y el efecto del viento debido a la acción de la velocidad del viento en la estructura del invernadero.

$$G = C_d \left[\left[\left(\frac{A_R A_S}{\sqrt{A_R^2 A_S^2}} \right) \right]^2 \left(2g \frac{\Delta T}{T} h \right) + \left(\frac{A_T}{2} \right) C_w V^2 \right]^{1/2} \quad (2.28)$$

Donde h (m) es distancia vertical ente el punto medio de la ventana lateral y la cenital.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Caso de estudio

El estudio se realizó en un invernadero semicerrado ubicado en el Instituto de Horticultura de la Universidad Humboldt de Berlín, Alemania. El clima del lugar es continental húmedo, con una temperatura media anual de 12 °C, precipitación pluvial media anual de 400 mm. Los vientos dominantes del lugar tienen dirección Este.

Como se muestra en la Figura 4, el invernadero bajo estudio es tipo venlo, compuesto de cuatro naves. Tiene 24 m de largo por 12.8 m y 6.7 m de alto, cubre un área de piso de 307.2 m² y un volumen de 2058.24 m³, el área de ventana es de 51.2 m² que representa el 16.67 % de la superficie del piso.

El invernadero está equipado con doble cristal, doble pantalla térmica, torre de enfriamiento, bomba de calor, switches hidráulicos, además de un tanque con agua para almacenamiento de energía de 300 m³ el cual está cubierto de aislante para evitar la pérdida de calor.



Figura 4. Invernadero semicerrado ubicado en la Universidad Humboldt de Berlín.

Las mismas plantas funcionan como una superficie de enfriamiento, al transpirar la planta se enfría, y el vapor de agua sube hacia el techo en donde se encuentran tubos corrugados, que son intercambiadores de calor (Figura 5) por donde circula agua a la temperatura de punto de rocío, allí se produce la condensación y el agua se recibe en unos canalones colocados debajo de los intercambiadores de calor, y que se deriva a un tanque de recolección.



Figura 5. Tubos corrugados de aluminio colocados bajo el techo del invernadero.

Debido a lo anterior, en este trabajo la condensación en la superficie de la cubierta es despreciable y solo se considera la condensación en los intercambiadores de calor colocados bajo el techo.

El invernadero semicerrado con cultivo de jitomate, cuenta con una estación meteorológica para la medición de las condiciones climatológicas externas, así como un sistema de fitomonitorio en el interior del mismo, en donde se registran las principales variables fisiológicas cada cinco minutos tales como transpiración, conductividad estomatal, fotosíntesis etc.

Las variables ambientales como temperatura, humedad relativa, concentración de CO_2 son registradas con 5 sensores ubicados en los extremos y centro del invernadero, los cuales se promedian para obtener un dato cada 30 segundos. La apertura y cierre de ventanas, inyección de CO_2 y la operación del sistema de calefacción fueron obtenidos de las bitácoras de operación del invernadero. Se utilizaron datos cada 5 minutos durante el periodo de enero a septiembre del año 2012.

En el presente trabajo, se utilizaron algunas ecuaciones y parámetros de los modelos propuestos por los siguientes autores: Jarvis (1976), Stanghellini (1987), Goudriaan y Van Laar (1994), Stanghellini y de Jong (1995), Roy et al. (2002), Bontsema, et al. (2007) y Van Beveren et al. (2014), los cuales fueron adaptados y los parámetros modificados para simular el comportamiento de la humedad, para el caso particular del invernadero semicerrado bajo estudio.

Todos los flujos de masa de vapor de agua, se pueden escribir en la forma de una ecuación de transferencia de masa, mediante la definición de la conductancia típica de un flujo, g ($\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ de suelo, es decir: ms^{-1}), que es la inversa de una resistencia:

$$\frac{d\chi_a}{dt} = \frac{1}{h} [E - C - V] \quad [\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}] \quad (3.1)$$

En el primer modelo solo se consideran los dos primeros términos de la ecuación (3.1), en el segundo modelo se introduce el tercer término de la ecuación correspondiente a la ventilación.

3.2. Modelo 1: comportamiento de la humedad del aire en el invernadero completamente cerrado

3.2.1. Supuestos del modelo

Los supuestos que se tomaron en cuenta para el desarrollo del modelo son los siguientes:

- Condiciones de contorno: temperatura del aire exterior, T_{ext} ($^{\circ}\text{C}$); humedad absoluta del aire en el exterior, χ_{ext} (gm^{-3}); radiación neta, R_n (Wm^{-2}) y el índice del área foliar, LAI, [$\text{m}^2(\text{hoja})\text{m}^{-2}(\text{suelo})$].
- Se considera que las ventanas cenitales están cerradas.
- Se considera el principio de distribución homogénea de las variables.
- El modelo de humedad del aire considera algunos procesos de intercambio de vapor de agua, como la transpiración del cultivo y el proceso de condensación en un intercambiador de calor.

3.2.2. Estados, entradas de control y entradas externas

El modelo para el invernadero cerrado se describe de la siguiente manera:

$$\dot{x} = f(t, x, u, w) \quad (3.2)$$

Donde t es el tiempo, x son los estados, u son las entradas, w son las entradas externas y f es una función no lineal.

El comportamiento dinámico de las ecuaciones de estado está descrito mediante ecuaciones diferenciales de primer orden no lineales adaptadas a las condiciones del invernadero.

A continuación se describen los procesos incluidos en el modelo.

3.2.3. Modelado de la humedad del aire

La ecuación diferencial que describe a la humedad absoluta del aire χ_a (gm^3) en el interior del invernadero es la siguiente

$$\frac{d\chi_a}{dt} = \frac{1}{h} [E - C] \quad (3.3)$$

Donde E ($\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$) es la transpiración de la planta, C ($\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$) es la condensación en los intercambiadores de calor y h (m) es la altura del invernadero.

3.2.4. Modelado de la transpiración

La física del proceso de transpiración (balance energético; vapor y transferencia de calor) permite escribir una ecuación explícita para la tasa de transpiración del cultivo E ($\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$).

Partiendo de la ecuación para la transpiración de un cultivo, propuesta por Stanghellini y De Jong (1995) y mencionada por Bontsema et al. (2007):

$$E = \frac{2LAI}{(1+\varepsilon)r_b+r_s} \left[\chi_a^* - \chi_a + \frac{\varepsilon r_b}{2LAI} \frac{R_n}{\lambda} \right] \quad (3.4)$$

Donde

LAI- es el índice de área foliar del cultivo.

ε - relación del calor latente y contenido de calor sensible del aire saturado para un cambio de 1 ° C en la temperatura.

χ_a - (gm^{-3}) concentración de vapor de aire. χ_a^* , concentración de vapor saturado es una función de la temperatura.

λ - (Jg^{-1}) calor latente de vaporización del agua, casi constante y aproximadamente 2450 para $T_a = 20^\circ\text{C}$

r_b - (sm^{-1}) resistencia a la transferencia de calor de la capa límite de la hoja.

r_s - (sm^{-1}) resistencia estomática.

R_n - (Wm^{-2}) radiación neta.

La ecuación 3.4 se puede reescribir como el flujo de vapor de agua debido a la transpiración en la planta E ($\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$), como ya se había expuesto en la ecuación 2.14:

$$E = g_E(\chi_{\text{cultivo}} - \chi_a) \quad (3.5)$$

Donde g_E (ms^{-1}) es la conductancia de la transpiración, χ_{cultivo} (gm^{-3}) concentración de vapor de agua del aire en el cultivo y χ_a (gm^{-3}) es la humedad absoluta del aire en el interior del invernadero.

La conductancia de la transpiración g_E descrita en la ecuación (2.15) se vuelve a reescribir en la ecuación (3.6)

$$g_E = \frac{2\text{LAI}}{(1+\varepsilon)r_b + r_s} \quad (3.6)$$

La relación del calor latente y contenido de calor sensible del aire saturado ε (adimensional) se determina utilizando

$$\varepsilon = 0.7584 \exp(0.0518 T_a) \quad (3.7)$$

Donde T_a ($^{\circ}\text{C}$) es la temperatura interna y para la resistencia de la capa límite de la hoja r_b (sm^{-1}) se utiliza la ecuación propuesta Stanghellini y De Jong (1995):

$$r_b = \frac{1174 d^{0.5}}{(d|T_{\text{cub}} - T_a| + 207 \varphi_{\text{wind}}^2)^{0.25}} \quad (3.8)$$

Con d (m) como la longitud de la hoja del cultivo, T_{cub} ($^{\circ}\text{C}$) es la temperatura de la cubierta y φ_{wind} (m s^{-1}) es la velocidad del viento dentro del invernadero.

La resistencia estomática en la ecuación (2.8), r_s (sm^{-1}) nuevamente es reescrita en la siguiente ecuación:

$$r_s = 82 \left(\frac{4.3}{0.54} \right) \left[\text{Exp} \left(\frac{-k R_n}{2 \text{LAI}} \right) \right] (1 + 0.023 (T_a - 20)^2) \quad (3.9)$$

Donde k (Jg^{-1}) es el coeficiente de extinción de la radiación, la radiación neta que absorbe el dosel R_n (Wm^{-2}) descrita en la ecuación (2.6) nuevamente se reescribe:

$$R_n = \tau (1 - \exp(-0.7 \text{LAI})) I_s \quad (3.10)$$

Donde τ (adimensional) coeficiente de transmisividad de la cubierta y I_s (Wm^{-2}) es la radiación solar en el exterior.

La concentración de vapor de agua del aire en el cultivo χ_{cultivo} (gm^{-3}) está dada por la siguiente ecuación

$$\chi_{\text{cultivo}} = \chi_a^* + \varepsilon \frac{r_b}{2 \text{LAI}} \frac{R_n}{\lambda} \quad (3.11)$$

Donde λ (Jg^{-1}) es el calor latente de vaporización del agua. La concentración de vapor de agua saturado χ_a^* (gm^{-3}) es:

$$\chi_a^* = 5.5638 \exp(0.0572 T_a) \quad (3.12)$$

Mientras que la concentración de vapor de agua absoluta del aire en el invernadero χ_a (gm^{-3}) según Bontsema et al. (2007), está en función de la humedad relativa, RH (%), como se ve en la ecuación 3.13.

$$\chi_a = \frac{\chi_a^* \text{RH}}{100} \quad (3.13)$$

A partir de la ecuación 3.13 se obtiene la humedad relativa como se muestra en la ecuación 3.14:

$$\text{RH} = \frac{100\chi_a}{5.5638\exp(0.0572T_a)} \quad (3.14)$$

3.2.5. Modelado de la condensación

La condensación del agua se lleva a cabo en intercambiadores de calor, el agua es colectada en canalones y llevada a un depósito, por lo que se desprecia la evaporación.

El flujo de masa de vapor de agua C ($\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$) del aire interior del invernadero debido a la condensación se calcula utilizando la expresión propuesta por Van Beveren et al. (2014):

$$C = g_c[0.2522\exp(0.0485T_a)(T_a - T_{ext}) - (\chi_a^* - \chi_a)] \quad (3.15)$$

Donde T_{ext} ($^{\circ}\text{C}$) es la temperatura externa del aire y g_c (ms^{-1}) es la conductancia de la condensación y se calcula utilizando la expresión propuesta por Van Beveren et al. (2014):

$$g_c \cong \max[0, 0.25^{-3}(T_a - T_{cub})^{1/3}] \quad (3.16)$$

El modelo se implementó en el ambiente MATLAB/SIMULINK. Se tiene un programa principal donde se definen los parámetros, las variables de entrada y las opciones de simulación; y un archivo SIMULINK donde se implementan las ecuaciones del modelo. Se utilizó el método de integración Runge-Kutta de

cuarto orden con tamaño de paso de integración variable ode45 con una tolerancia de 1×10^{-10} .

Para este modelo el coeficiente del volumen del aire dentro del invernadero respecto a la superficie del mismo (h) tiene un valor de 6.7m, para la resistencia de la capa límite de la hoja (r_b) se tomó un valor de 200 sm^{-1} encontrado en Bontsema et al. (2007), para el coeficiente de extinción de la radiación (k) un valor de 0.8 (Carranza et al., 2008) y para la transmisividad de la luz (τ) el valor de 0.7 (Van Beveren et al., 2014).

3.2.6. Medidas de ajuste

Con el fin de medir la calidad de la parametrización del modelo 1 se utilizaron varios índices estadísticos, para medir el ajuste del modelo a los datos medidos, tales como el error cuadrado medio, la raíz del error cuadrado medio, la raíz relativa del error cuadrado medio y la eficiencia (Brun et al., 2013).

a) Error cuadrado medio (MSE)

El error cuadrado medio (MSE) es la medida más utilizada, definido como:

$$\text{MSE} = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.17)$$

donde y_i es el valor medido, $\hat{y}_i$ el valor simulado correspondiente, y n el número de mediciones. Debido a que MSE es un promedio de las diferencias al cuadrado, grandes diferencias son muy ponderadas. Es importante verificar si MSE no se debe esencialmente a uno o dos grandes diferencias.

b) Raíz del error cuadrado medio (RMSE)

A menudo es más conveniente trabajar con la raíz cuadrada de MSE, llamado la raíz del error cuadrado medio (RMSE), que tiene las mismas unidades:

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (3.18)$$

c) Raíz relativa del error cuadrado medio (RRMSE)

Otra medida de evaluación es la raíz relativa del error cuadrático medio (RRMSE), definida como

$$RRMSE = RMSE/\bar{y} \quad (3.19)$$

Donde $\bar{y}$ es el promedio de los valores medidos. Esta medida es adimensional; expresa el error como una fracción del valor promedio medido. También, RRMSE puede ser más significativo que RMSE para comparar errores basados en diferentes conjuntos de datos con diferentes respuestas promedio.

d) Error absoluto medio

Una alternativa resumida de la medida del error del modelo, que al igual que MSE evita la compensación entre la sub predicción y sobre predicción, es el error absoluto medio (MAE):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (3.20)$$

Las unidades de MAE son las mismas que para MSE; además, no hay sobre ponderación de las grandes diferencias. Así MAE tiene ventajas sobre MSE o RMSE, si el objetivo es simplemente para examinar el error global del modelo (Willmott y Matsuura, 2005).

Una ventaja del MSE es que se puede descomponer en contribuciones separadas. La mayoría de las veces $MAE \leq RMSE$, y la igualdad sólo se produce si todos los errores que se promediaron son iguales.

e) Error absoluto medio relativo

El error absoluto medio relativo (RMAE), es definido como

$$\text{RMAE} = \frac{\text{MAE}}{(1/n) \sum |y_i|} \quad (3.21)$$

Una variante sería

$$\text{RMAE}' = (1/n) \sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}| / |y_i| \quad (3.22)$$

Donde cada diferencia se divide por el valor medido para esa situación.

Si y_i es pequeña, la contribución a RMAE' podría ser muy grande.

f) Coeficiente de determinación

El coeficiente de determinación (r^2) que describe la proporción de la varianza total en los datos observados que puede ser explicado por el modelo, se calcula como:

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.23)$$

El rango de valores de r^2 va de 0.0 a 1.0, un valor de $r^2 = 1.0$ indica un ajuste perfecto entre resultados experimentales y las simulaciones, y $r^2 = 0.0$ significa cero ajuste entre los dos resultados. El coeficiente de determinación es demasiado sensible a valores extremos e insensible a diferencias aditivas y proporcionales entre predicciones del modelo y observaciones (Ruiz, 2009).

3.2.7. Calibración

Estimación de parámetros o calibración de un modelo es el proceso de alterar los parámetros para obtener un mejor ajuste entre los resultados del modelo y los datos medidos (Ruiz, 2009).

La calibración define los principales aspectos de los modelos mediante la variación de los parámetros, dentro de rangos razonables con el fin de mejorar el ajuste entre los valores medidos y simulados, la calibración es necesaria en la mayoría de los casos, ya que algunos de los valores de los parámetros no están disponibles en la literatura, o no son exactamente los que requiere el modelo.

De acuerdo con Tap (2000), los parámetros seleccionados para calibración son aquellos, (i) que son inciertos, (ii) que más afectan el comportamiento del modelo (sensibilidad) y (iii) que afectan el comportamiento del modelo de manera que es necesario obtener un mejor ajuste entre datos simulados y medidos.

La importancia de la calibración radica en la compensación de los errores de los parámetros. Las ecuaciones con diferentes valores para los parámetros pueden dar diferentes resultados, tanto cualitativos como cuantitativos.

El método de mínimos cuadrados se usa ampliamente para estimar los valores numéricos de los parámetros y ajustarlos a los datos (Abdi, 2004). En dicho ajuste los parámetros se determinan al minimizar la suma de los residuales cuadráticos (Madsen et al., 2004).

En resumen, la calibración es un problema de optimización no lineal, en donde el objetivo es la minimización del error cuadrado medio sujeto a los límites inferiores y superiores de los parámetros y se plantea como:

$$\text{Min } \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \quad (3.24)$$

$$L_{Ipi} < p_i < L_{Spi}$$

En donde L_{Ipi} y L_{Spi} son el límite inferior y superior del valor de los parámetros del modelo respectivamente, y p_i es el i -ésimo parámetro con $i = 1, \dots, n$.

3.3. Modelo 2: Comportamiento de la humedad del aire en el invernadero semicerrado cuando las ventanas se encuentran abiertas

3.3.1. Supuestos del modelo

Los supuestos que se tomaron en cuenta para el desarrollo del modelo son los siguientes:

- El volumen de aire dentro del invernadero se considera constante.
- Condiciones de contorno: temperatura del aire exterior, T_{ext} (°C); humedad absoluta del aire en el exterior, χ_{ext} (gm⁻³); radiación neta, R_n (Wm⁻²) y el índice del área foliar, LAI, [m²(hoja)m⁻²(suelo)].
- Se considera que las ventanas cenitales están abiertas.
- Se considera el principio de distribución homogénea de las variables, el valor de las variables es el mismo en cualquier punto del invernadero.
- Las características físicas del aire son constantes bajo cierta temperatura a lo largo del tiempo.

El modelo desarrollado en esta investigación está basado en los modelos de Stanghellini (1987), Bontsema et al (2007) y de Jong (1990). A partir de los modelos desarrollados por estos autores se desarrolló un nuevo modelo que incorpora las características particulares del invernadero semicerrado y las condiciones climáticas de la región.

A continuación se tiene una descripción de la humedad del aire y el proceso de ventilación.

3.3.2. Modelado de la humedad del aire

La ecuación diferencial que describe la humedad del aire χ_a (gm^{-3}) en el interior del invernadero es la siguiente

$$\frac{d\chi_a}{dt} = \frac{1}{h} [E - C - V] \quad (3.25)$$

Donde V ($\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$) es la ventilación dentro del invernadero.

Para el modelado de la transpiración y la condensación se utilizan las mismas ecuaciones que en el modelo 1.

3.3.3. Modelado de la ventilación

El flujo de vapor de agua debido a la ventilación V se modela con la ecuación Bontsema et al. (2007):

$$V = g_V(\chi_a - \chi_{\text{ext}}) \quad (3.26)$$

Donde g_V (ms^{-1}) es la conductancia de la ventilación y χ_{ext} (gm^{-3}) es la humedad absoluta del aire externo.

Donde la conductancia de la ventilación se obtiene:

$$g_V = (\varphi_{\text{lek}} + \varphi_{\text{win}}) \quad (3.27)$$

La infiltración φ_{lek} (m^3s^{-1}) se determina en la expresión 3.28

$$\varphi_{lek} = 0.000083 + 0.000035 * V_o * f_a \quad (3.28)$$

Donde V_o ($m s^{-1}$) es la velocidad inicial del viento, para fines de este modelo

$V_o = 1$, y $f_a=1$ (adimensional) es un factor de infiltración.

La ventilación a través de las ventanas φ_{win} ($m^3 s^{-1}$) está dada por

$$\varphi_{win} = \sqrt{\left| \varphi_{wind}^2 + (\varphi_{dT_{lsd}} + \varphi_{dT_{wsd}})^2 \right|} \quad (3.29)$$

Donde φ_{wind} ($m s^{-1}$) es la velocidad del viento dentro del invernadero,

$\varphi_{dT_{lsd}}$ ($m^3 s^{-1}$) es la ventilación sotavento debido a la diferencia entre la

temperatura interna y la externa, y $\varphi_{dT_{wsd}}$ ($m^3 s^{-1}$) es la ventilación en el

barlovento.

La velocidad del viento dentro del invernadero φ_{wind} , está dada por la siguiente expresión

$$\varphi_{wind} = (f_{lsd} * fr_{window_{lsd}} + f_{wsd} * fr_{window_{wsd}}) V_o L_1 L_2 \quad (3.30)$$

Donde L_1 (m) es el largo de la ventana y L_2 (m) es el ancho de la ventana.

$fr_{window_{lsd}}$ (m^{-2}) es el número de ventanas para la ventilación a sotavento por

metro cuadrado de suelo y $fr_{window_{wsd}}$ es el número de ventanas para la

ventilación a barlovento (m^{-2}).

La ventilación a sotavento f_{lsd} ($m^3 s^{-1}$) se expresa en la ecuación 3.31

$$f_{lsd} = c_{31}(Ap_{lsd})^3 - c_{21}(Ap_{lsd})^2 + c_{11}Ap_{lsd} + c_{01} \quad (3.31)$$

Donde c_{31} , c_{21} , c_{11} , c_{01} son coeficientes empíricos y Ap_{lsd} (adimensional) es el

número de ventanas sotavento.

La ventilación a barlovento f_{wsd} ($m^3 s^{-1}$) se calcula utilizando la ecuación 3.32

$$f_{wsd} = c_{32}(Ap_{wsd})^3 - c_{22}(Ap_{wsd})^2 + c_{12}Ap_{wsd} + c_{02} \quad (3.32)$$

Donde c_{32} , c_{22} , c_{12} , c_{02} son coeficientes empíricos y Ap_{wsd} (adimensional) es el número de ventanas barlovento.

La ventilación sotavento debido a la diferencia de temperatura $\varphi_{dT_{lsd}}$ (m^3s^{-1}) se determina utilizando la ecuación 3.33

$$\varphi_{dT_{lsd}} = (1/3)a_1L_1\sqrt{|g(1/283)|(T_{ext} - T_a)}(fr_{window_{lsd}})(L_{win_{lsd}})^{1.5} \quad (3.33)$$

Donde a_1 (adimensional) es un coeficiente de transporte, g ($m s^{-1}$) aceleración de la gravedad y $L_{win_{lsd}}$ (m) es la longitud de la apertura vertical de la ventana en el lado de sotavento y esta descrita por la ecuación 3.34:

$$L_{win_{lsd}} = L_2(\sin(\gamma_{rad}) - \sin(\gamma_{rad} - (Ap_{lsd}/100)\theta_{max})) \quad (3.34)$$

Donde γ_{rad} (rad) es la pendiente del techo y está dado por la ecuación 3.35, donde γ es la pendiente del techo ($^\circ$).

$$\gamma_{rad} = (\pi/180)(\gamma) \quad (3.35)$$

Y θ_{max} ($^\circ$) es el ángulo de apertura de la ventana, expresado en la ecuación 3.36:

$$\theta_{max} = 50(2\pi)/360 \quad (3.36)$$

La ventilación en el barlovento debido a la diferencia de temperatura $\varphi_{dT_{wsd}}$ (m^3s^{-1}) está dada por:

$$\varphi_{dT_{wsd}} = (1/3)a_1L_1\sqrt{|g(1/283)|(T_{ext} - T_a)}(fr_{window_{wsd}})(L_{win_{wsd}})^{1.5} \quad (3.37)$$

La longitud de la apertura vertical de la ventana en el lado de barlovento $L_{win_{wsd}}$ (m), está descrita en la ecuación 3.38:

$$L_{win_{wsd}} = L_2(\sin(\gamma_{rad}) - \sin(\gamma_{rad} - (Ap_{wsd}/100)\theta_{max})) \quad (3.38)$$

3.3.4. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad (AS) es el estudio de cómo la incertidumbre en la salida de un modelo (numérico o de otra manera) se puede distribuir a diferentes fuentes de incertidumbre en la entrada del modelo. El AS es, por lo tanto, considerado por algunos como un requisito previo para la construcción de modelos en cualquier entorno (Saltelli, 2002).

El objetivo de un análisis de sensibilidad es evaluar la importancia relativa que las variables de entrada, las condiciones iniciales de las variables de estado y los parámetros del modelo tienen sobre la evolución en el tiempo de las variables de estado y las salidas (Saltelli et al., 2000).

El análisis de sensibilidad se puede dividir en dos grandes categorías: análisis de sensibilidad local y global. Métodos de análisis de sensibilidad local se refieren a pequeños cambios de los parámetros, mientras que los métodos globales se refieren al efecto de los cambios simultáneos.

En este trabajo se realizó el análisis de sensibilidad de primer orden alrededor de un punto nominal de los parámetros, lo cual implica resolver un conjunto de ecuaciones diferenciales adicionales a las del modelo (Van Henten et al., 1994).

Las sensibilidades respecto a cada parámetro se expresan en la ecuación 3.39:

$$S_y = \frac{\partial y}{\partial p} = \frac{\partial g}{\partial p} S + \frac{\partial g}{\partial p} \quad (3.39)$$

Donde S_y es la sensibilidad de la salida, p es el valor del parámetro.

La sensibilidad relativa fue calculada mediante la ecuación 3.40.

$$S_{rel} = \frac{\partial g}{\partial p} \cdot \frac{p^0}{g^0} \quad (3.40)$$

Sin embargo, dado que las sensibilidades son funciones variantes en el tiempo, la integral del valor absoluto de la sensibilidades relativas en el periodo de crecimiento del cultivo $[0, t, f]$, dada en la ecuación 3.41

$$I = \int_0^{tf} |S| dt \quad (3.41)$$

fue definida y calculada para poder determinar los parámetros que afectan en mayor medida el comportamiento del modelo.

El análisis de sensibilidad se implementó en el modelo 2, debido a que se tiene un elevado número de parámetros y fue necesaria la identificación de los parámetros más importantes. Después del análisis de sensibilidad del modelo 2, se procedió a realizar la calibración del mismo, donde al igual que el modelo 1 se planteó como un problema de optimización no lineal en donde el objetivo es la minimización del error cuadrado medio sujeto a los límites inferiores y superiores de los parámetros como lo describe la ecuación 3.24.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Modelo 1: comportamiento de la humedad del aire en Invernadero cerrado

El modelo descrito en la sección 3.2 se implementó para las características particulares del invernadero semicerrado bajo estudio, en el ambiente MATLAB/SIMULINK. Se tiene un programa principal donde se definen los parámetros, las variables de entrada y las opciones de simulación; y un archivo SIMULINK donde se implementan las ecuaciones del modelo. Se utilizó el método de integración Runge-Kutta de cuarto orden con tamaño de paso de integración variable ode45 con una tolerancia de 1×10^{-10} .

Los resultados de la implementación del modelo1 utilizando los parámetros sugeridos en la literatura, se muestran en la Figura 6, la simulación de la humedad absoluta y la humedad relativa dentro del invernadero presentan una sobrestimación y subestimación, existe un pobre ajuste del modelo. Se requiere la calibración de los parámetros, para obtener valores óptimos que mejoren el ajuste del modelo.

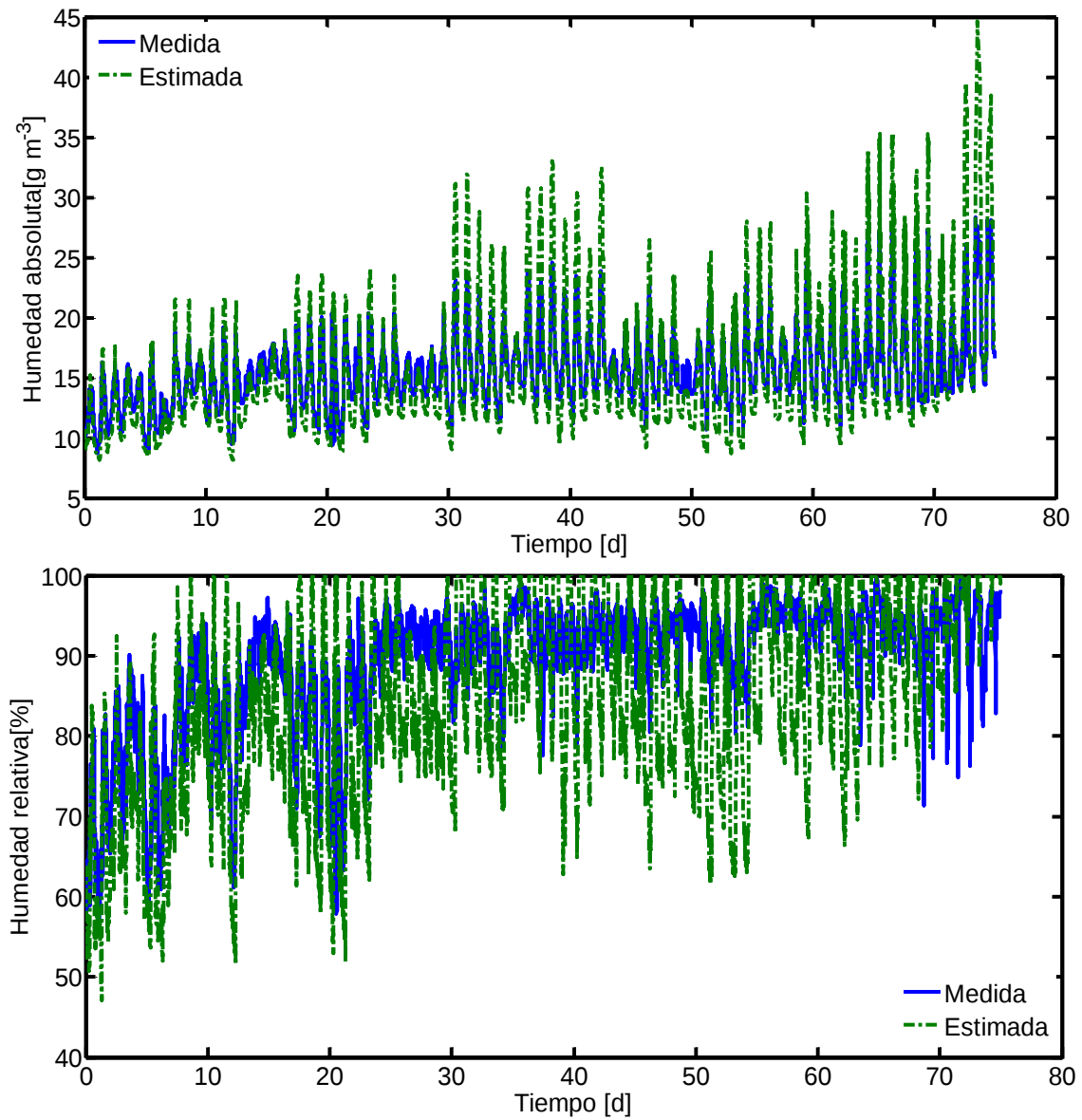


Figura 6. Humedad absoluta y relativa medidas (azul) y estimadas (verde) con parámetros reportados en la literatura (15 de febrero al 29 de abril del 2012).

En el modelo 1 se omite el análisis de sensibilidad, dado que solo se tienen cuatro parámetros, se procede directamente a la calibración, los parámetros a calibrar son los siguientes: El coeficiente del volumen del aire dentro del invernadero respecto a la superficie del mismo [h (m)], la resistencia de la capa límite de la hoja [r_b (Jg^{-1})], coeficiente de extinción de la radiación [k (adimensional)] y la transmisividad de la luz [τ (adimensional)].

Para la calibración del modelo fue necesario ubicar los rangos dentro de los cuales los valores de los parámetros fueran óptimos. Los límites inferior y superior se presentan en Cuadro 2.

Cuadro 2. Límite inferior y superior para cada parámetro.

Parámetro	Límite inferior	Límite superior
Coeficiente del volumen del aire dentro del invernadero respecto a la superficie del mismo (h)	5	10
Resistencia de la capa límite de la hoja (r_b)	100	150
Coeficiente de extinción de la radiación (k)	0	0.4
Transmisividad de la luz (τ)	0.6	0.7

Se perturbo el límite superior e inferior de cada parámetro en un 10%, dejando constantes estos límites para el resto de los parámetros. Se probaron entre 9 y 5 rangos de variación en cada parámetro y se eligió el rango de variación con los mejores resultados de los índices estadísticos.

El rango de variación donde se encontraron los mejores índices estadísticos para los parámetros h, r_b, k y τ se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Índices estadísticos para el mejor rango de variación de los parámetros y valor óptimo de los mismos.

Parámetro	Rango de variación	r^2	MSE	RMSE	MAE	RMAE	Valor óptimo de los parámetros
h	5-10	0.7648	9.9982	3.1620	1.9221	0.1006	$h=5$
r_b	100-150	0.7648	9.9982	3.1620	1.9221	0.1006	$r_b=100$
k	0-0.4	0.7716	10.0388	3.1684	1.9413	0.1016	$k=0.4$
τ	0.6-0.8	0.7716	10.0388	3.1684	1.9413	0.1016	$\tau=0.7$

MSE = Error cuadrado medio, RMSE = Raíz del error cuadrado medio, MAE = Error absoluto medio, r^2 = Coeficiente de determinación, RMAE = Error absoluto medio relativo.

Los valores óptimos de los parámetros presentados en el Cuadro 3, se utilizaron para implementar el modelo ya calibrado teniendo como resultado un mejor ajuste de la humedad estimada respecto a la medida como se muestra en la Figura 7.

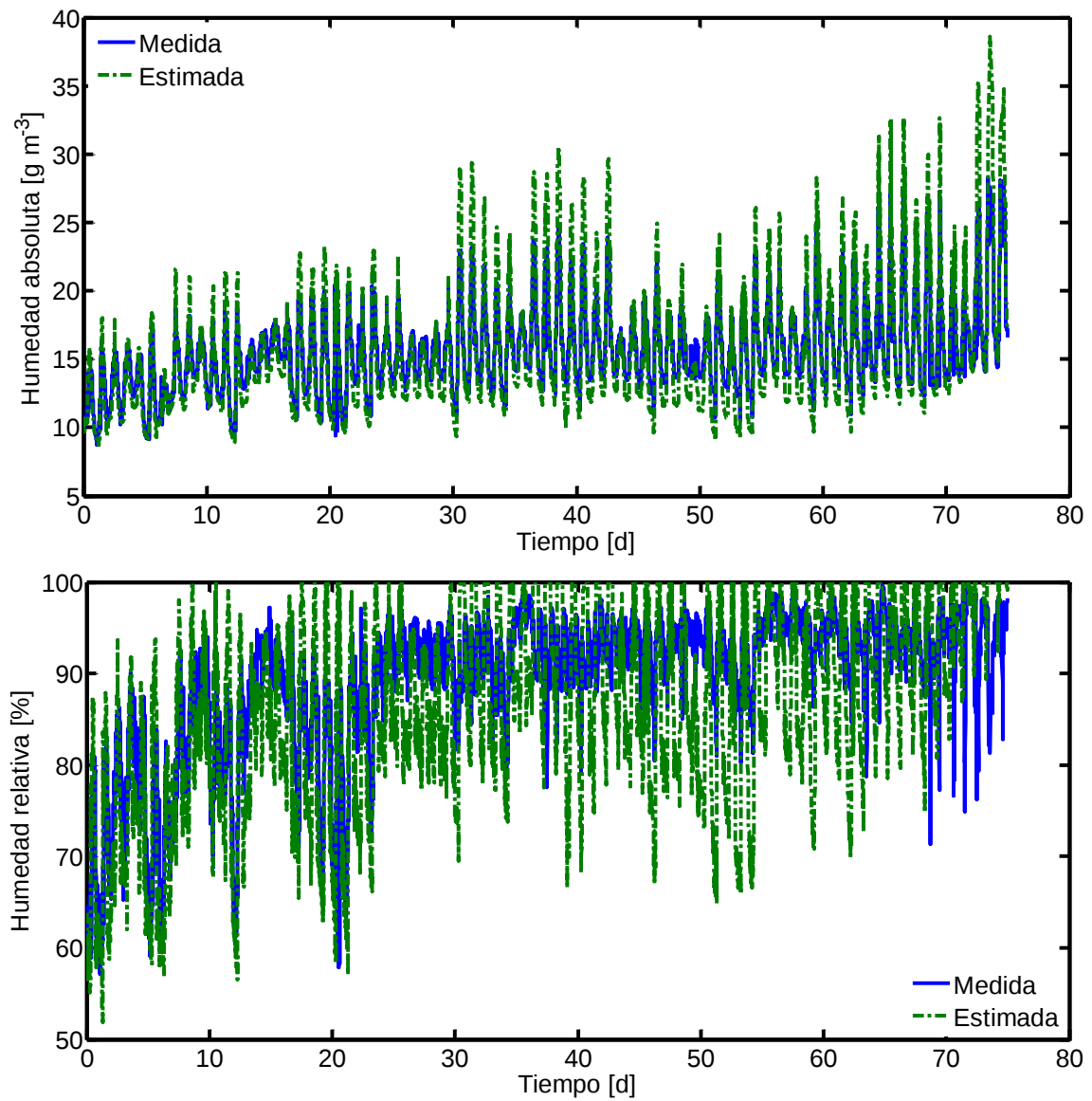


Figura 7. Humedad absoluta y relativa medidas (azul) y estimadas (verde) con parámetros óptimos después de la calibración del modelo (15 de febrero al 29 de abril del 2012).

El Cuadro 4 resume los resultados obtenidos en la calibración del modelo 1, en donde se presentan las medidas de ajuste tanto inicial como final, así como los valores de los parámetros obtenidos después de la calibración.

Cuadro 4. Resultados de la calibración del Modelo 1.

Valor nominal	Medidas de ajuste inicial	Rango de variación	Valor después de la calibración (Óptimos)	Medidas de ajuste final
$h=6.7$	MSE = 15.3466	$5 < h < 10$	$h=5$	MSE =10.0388
$r_b=200$	RMSE= 3.9175	$100 < r_b < 150$	$r_b=100$	RMSE= 3.1684
$k=0.8$	MAE= 2.4829	$0 < k < 0.4$	$k = 0.4$	MAE= 1.9413
$\tau=0.7$	$r^2 = 0.7041$	$0.6 < \tau < 0.8$	$\tau= 0.7$	$r^2 = 0.7716$
	RMAE=0.1235			RMAE=0.1016

MSE = Error cuadrado medio, RMSE = Raíz del error cuadrado medio, MAE = Error absoluto medio, r^2 = Coeficiente de determinación, RMAE = Error absoluto medio relativo.

Debido a la cantidad de datos considerados en la simulación del modelo 1, no se observa gran diferencia entre las Figuras 6 y 7; debido a lo anterior, se realiza una nueva corrida del modelo calibrado para 2 días, con la finalidad de observar el ajuste que se logró con la calibración del modelo, los resultados se muestran en las Figuras 8 y 9.

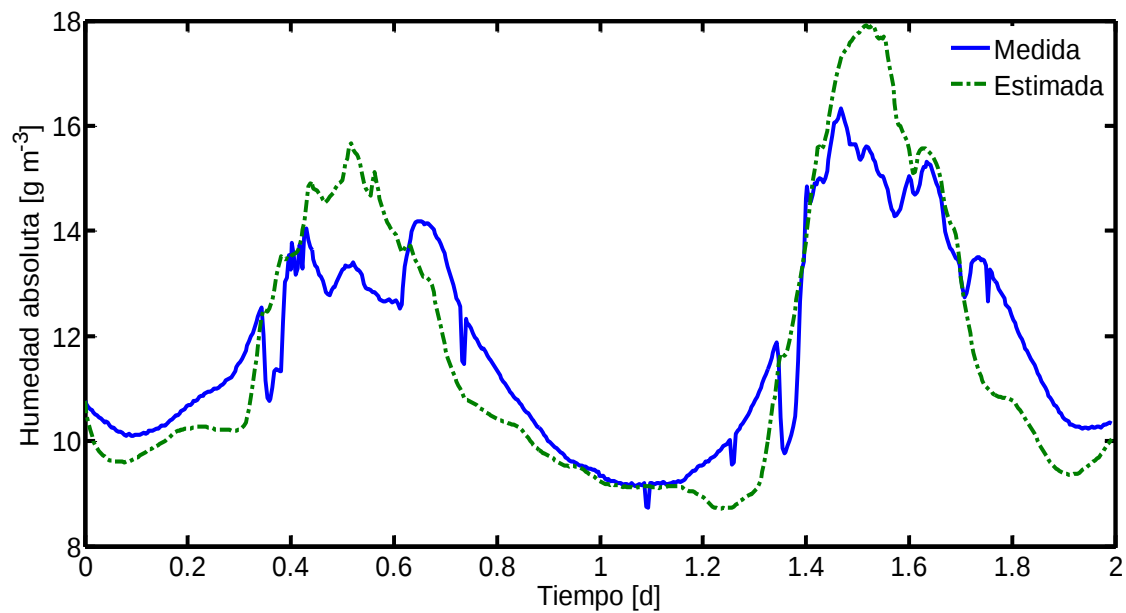
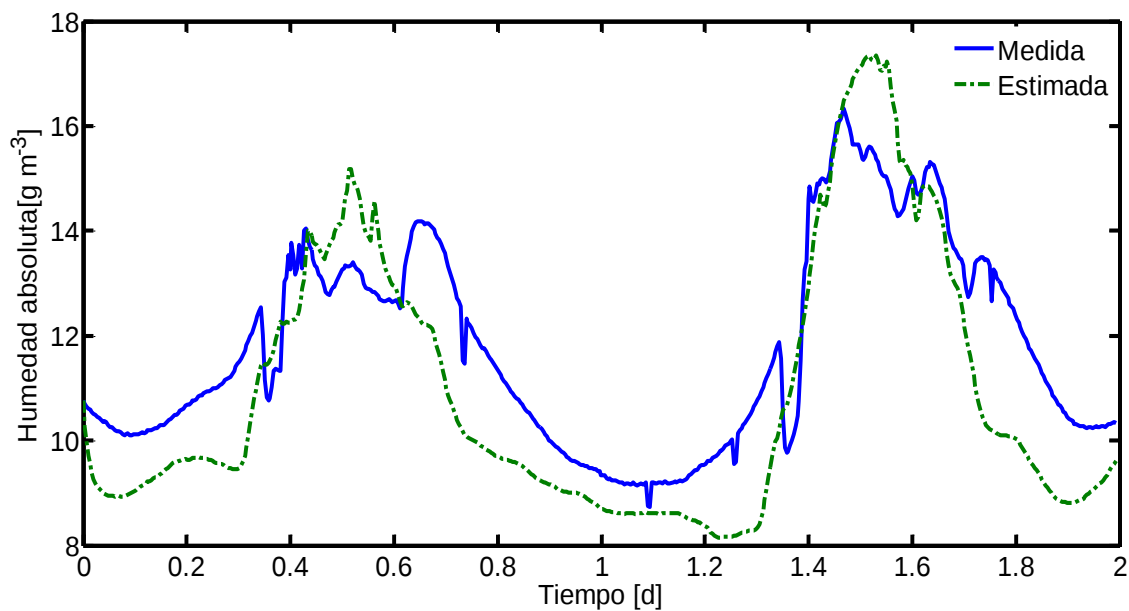


Figura 8. Humedad absoluta medida (azul) y estimada (verde) antes (arriba) y después de la calibración (abajo) del modelo (15 y 16 de febrero del 2012).

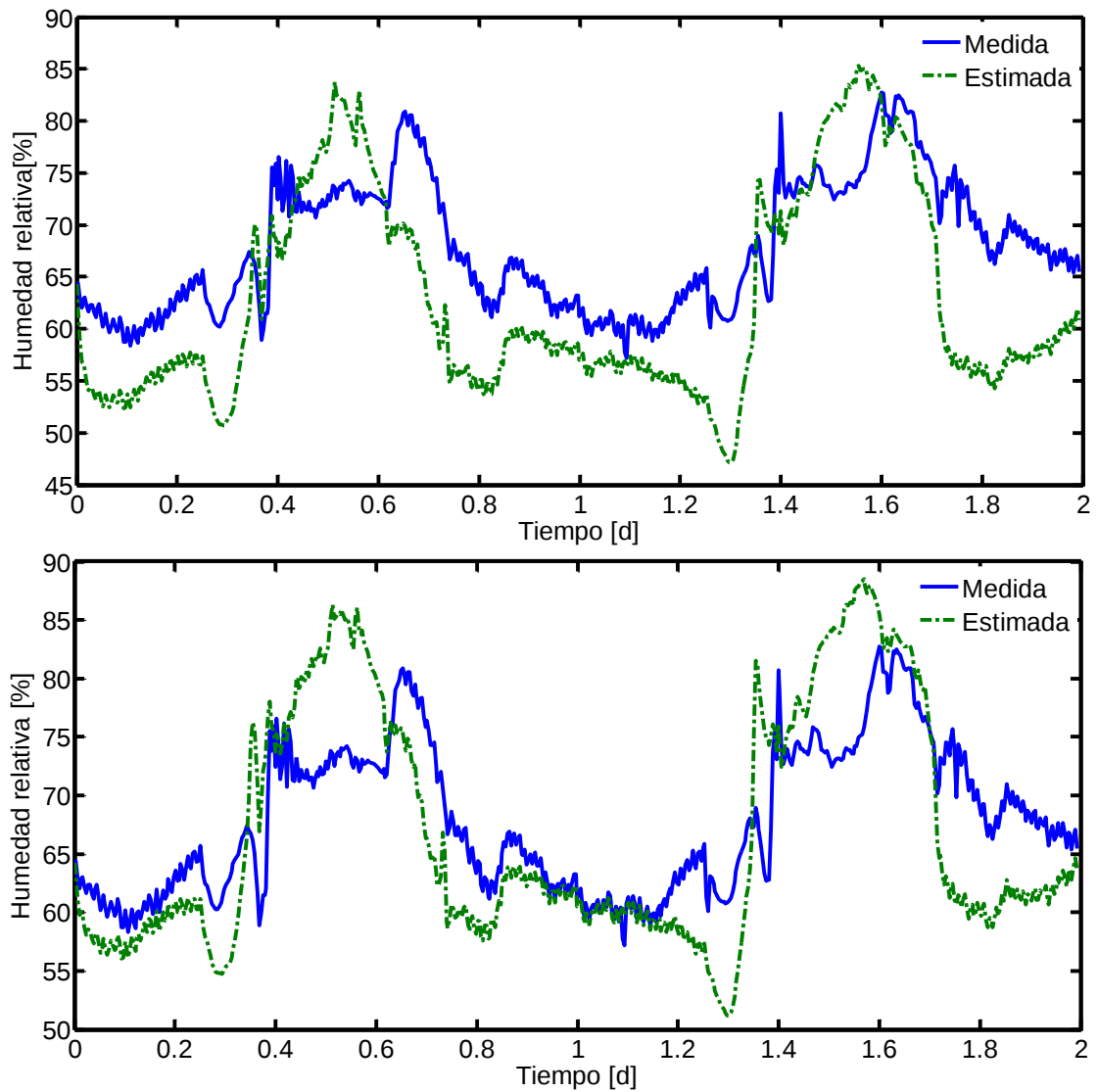


Figura 9. Humedad relativa medida (azul) y estimada (verde) antes (arriba) y después (abajo) de la calibración del modelo (15 y 16 de febrero del 2012).

Con la calibración se pudo mejorar el desempeño del modelo, aunque de acuerdo a la Figuras 8 y 9 se logró un mejor ajuste para la humedad absoluta.

4.2. Modelo 2: comportamiento de la humedad del aire en el invernadero semicerrado cuando las ventanas están abiertas

El modelo descrito en la sección 3.3 se implementó para las características particulares del invernadero semicerrado bajo estudio, en el ambiente MATLAB/SIMULINK. Se tiene un programa principal donde se definen los parámetros, las variables de entrada y las opciones de simulación; y un archivo SIMULINK donde se implementan las ecuaciones del modelo. Se utilizó el método de integración Runge-Kutta de cuarto orden con tamaño de paso de integración variable ode45 con una tolerancia de 1×10^{-10} .

En este modelo se consideran los procesos de transpiración, condensación y ventilación; para el proceso de ventilación se generó un submodelo de la ventilación específica llamado Specific Vent (ver apéndice G), este está incorporado mediante una subrutina al programa principal del modelo 2.

El valor de los parámetros utilizados en este modelo son los siguientes: calor latente de vaporización del agua, $\lambda = 2540 \text{ Jg}^{-1}$ (Van Beveren et al., 2014); coeficiente de extinción de la radiación, $k = 0.8$ (Carranza et al., 2008); resistencia de la capa límite de la hoja, $r_b = 200 \text{ Jg}^{-1}$ (Bontsema, et al. 2007); transmisividad de la luz $\tau = 0.7$ (Van Beveren et al., 2014). Además, se utilizaron las características del invernadero bajo estudio proporcionados al inicio de la sección de materiales y métodos: longitud de la ventana, $L_1 = 3.2 \text{ m}$; número de ventanas, $n_v = 20$; área del suelo del invernadero, $A_s = 307.2 \text{ m}^2$; ancho de la ventana, $L_2 = 0.8 \text{ m}$; pendiente del techo $\gamma = 24.9^\circ$.

Los resultados de la simulación del modelo 2 se presentan en la Figura 12, en esta primera corrida del modelo los valores de los parámetros son los proporcionados en la literatura, es por esto que existe en general una subestimación de la humedad medida.

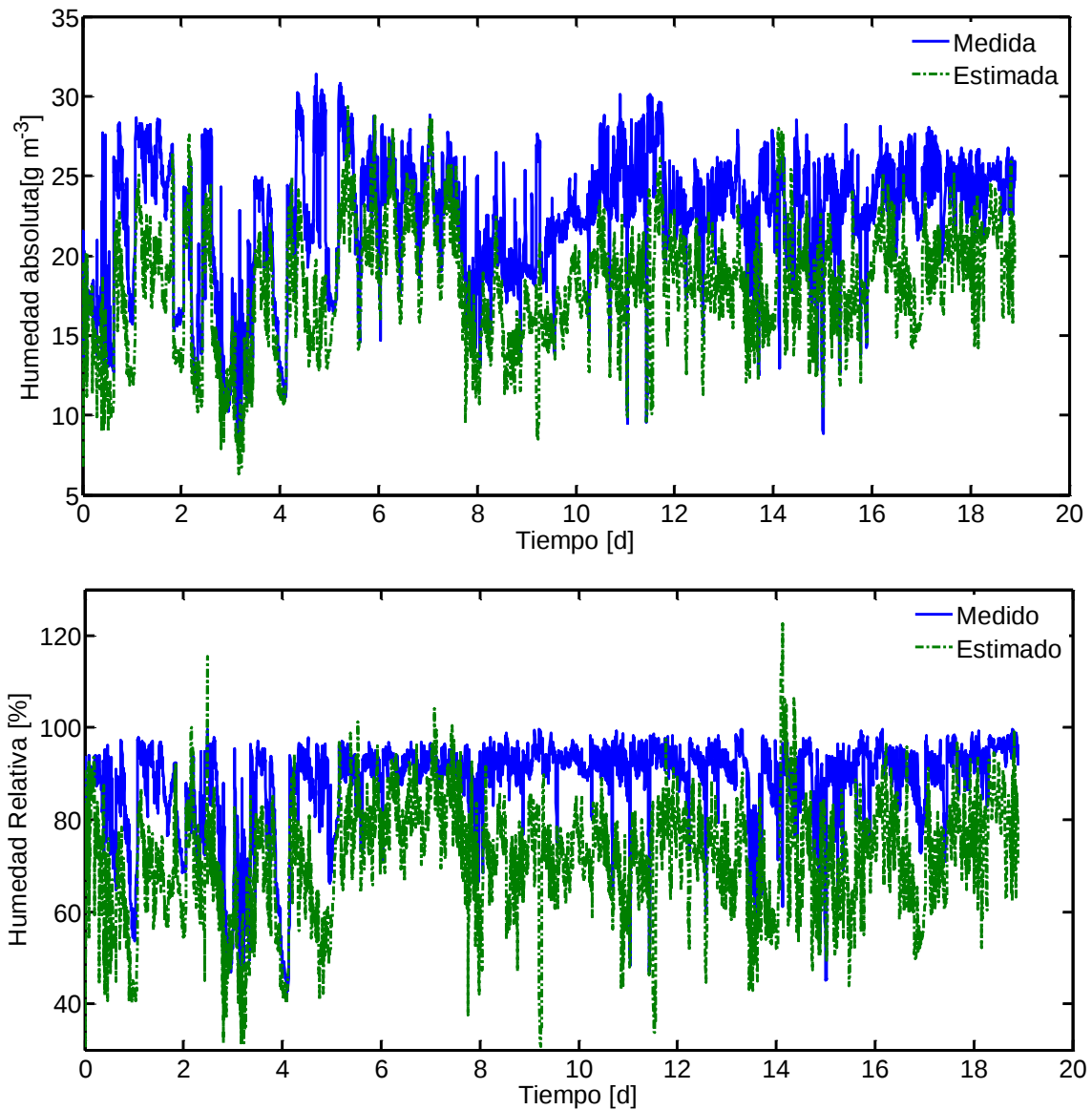


Figura 10. Humedad absoluta y relativa medidas (azul) y estimadas (verde) con parámetros reportados en la literatura del modelo 2 (9 de marzo al 4 de julio del 2012).

El análisis de sensibilidad se implementa con el fin de detectar los parámetros que más influyen sobre el modelo.

El objetivo del análisis de sensibilidad es evaluar la importancia relativa que los parámetros del modelo, tienen sobre la evolución en el tiempo de las variables de estado y las salidas (Saltelli *et al.*, 2000).

Haciendo uso de las ecuaciones para el análisis de sensibilidad que fueron descritas en la sección 3.3.4, se generan las Figuras 10 y 11 con los resultados del análisis de sensibilidad para los 9 parámetros del modelo: λ , k , L_1 , n_v , A_s , L_2 , r_b , γ , τ , las cuales fueron descritas al inicio de esta sección.

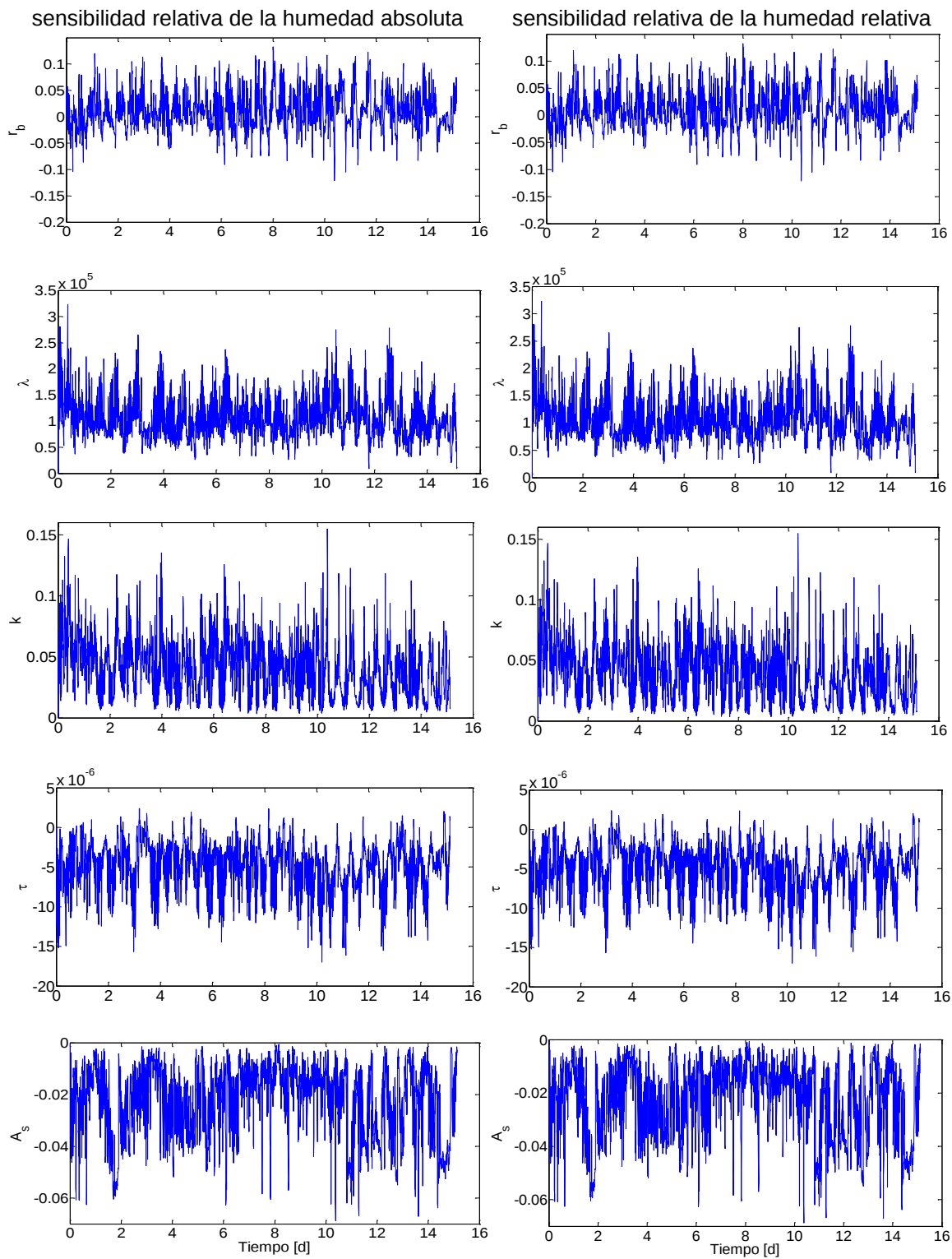


Figura 11. Sensibilidad relativa de la humedad absoluta (izquierda) y sensibilidad relativa de la humedad relativa (derecha) respecto a los parámetros $r_b, \lambda, k, \tau, A_s$.

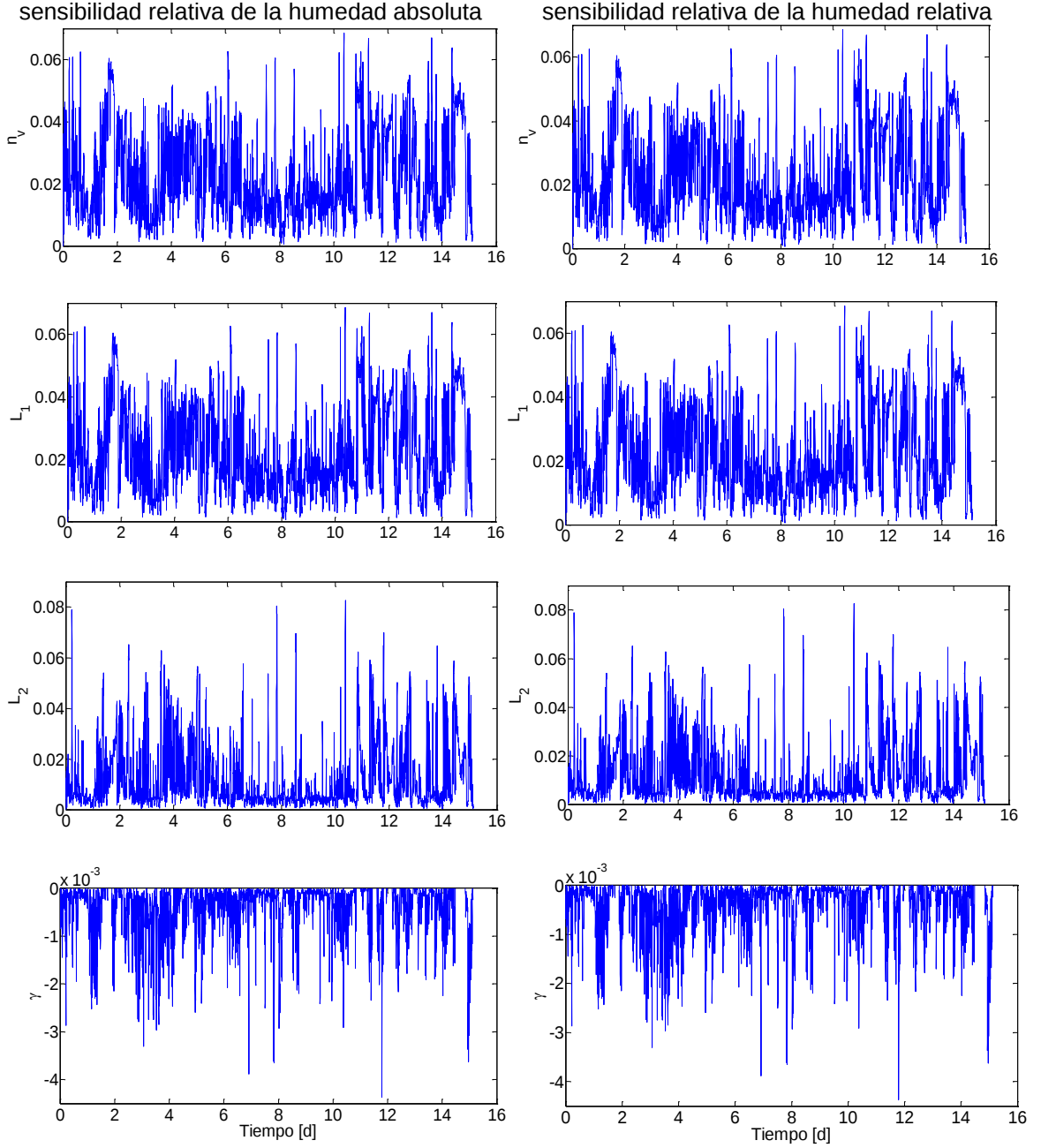


Figura 12. Sensibilidad relativa de la humedad absoluta (izquierda) y sensibilidad relativa de la humedad relativa (derecha) respecto a los parámetros $n_v, L_1, A_s, L_2, \gamma$.

El Cuadro 5 presenta los índices de sensibilidad para todos los parámetros, se eligieron los parámetros con mayor índice de sensibilidad para la calibración: calor latente de vaporización del agua (λ), coeficiente de extinción de la radiación (k), longitud de ventanas (L_1), número de ventanas (n_v), área del suelo del invernadero (A_s), ancho de ventanas (L_2) y resistencia de la capa límite de la hoja (r_b).

Cuadro 5. Valores de los índices de sensibilidad para los parámetros λ , k , L_1 , n_v , A_s , L_2 , r_b , γ , τ .

Parámetro	Índices de sensibilidad		
	sensibilidad relativa de la humedad absoluta	sensibilidad relativa de la humedad relativa	sensibilidad absoluta de la humedad absoluta
λ	1.3721×10^{11}	1.3721×10^{11}	1.1112×10^9
k	5.2802×10^4	5.2802×10^4	1.3437×10^8
L_1	3.0172×10^4	3.0172×10^4	1.8261×10^5
n_v	3.0172×10^4	3.0172×10^4	2.9218×10^4
A_s	3.0172×10^4	3.0172×10^4	1.9022×10^3
L_2	1.6123×10^4	1.6123×10^4	3.8178×10^5
r_b	1.3671×10^4	1.3671×10^4	2.4836×10^3
γ	486.0123	486.0123	404.1606
τ	6.2290	6.2290	1.6065×10^4

Después de realizar el análisis de sensibilidad, se realiza la calibración de los parámetros elegidos.

Al igual que en el modelo 1, fue necesario ubicar los rangos óptimos para cada parámetro, se perturbó cada parámetro en un 30% y hasta un 60% en los casos particulares de λ y L_1 .

Se probaron entre 9 rangos de variación en cada parámetro y se eligió el rango de variación con los mejores resultados de los índices estadísticos y el valor óptimo de los parámetros (Cuadro 6).

Cuadro 6. Resultados de la calibración del Modelo 2.

Parámetro	Rango de variación	r^2	MSE	RME	MAE	RMAE	Valor óptimo de los parámetros
λ	1016-2540	0.4493	16.057	4.0071	3.1464	0.1406	$\lambda = 2539.6$
k	0.665-0.7	0.4493	16.057	4.0071	3.1464	0.1406	$k = 0.7$
L_1	1.28-3.2	0.6545	9.4270	3.0703	2.3726	0.1060	$L_1 = 1.3$
n_v	16-17	0.7023	8.696	2.9489	2.2748	0.1016	$n_v = 16.6$
A_s	291.84-307.2	0.7023	8.696	2.9489	2.274	0.1016	$A_s = 307.2$
L_2	0.64-0.68	0.7263	8.4118	2.9003	2.2371	0.0999	$L_2 = 0.7$
r_b	0.9-0.95	0.7278	8.0729	2.8413	2.1946	0.0977	$r_b = 92.5$

MSE = Error cuadrado medio, RMSE = Raíz del error cuadrado medio, MAE = Error absoluto medio, r^2 = Coeficiente de determinación, RMAE = Error absoluto medio relativo.

Una vez obtenidos los resultados de los rangos de variación y los valores óptimos de los parámetros se implementó el modelo ya calibrado, teniendo como resultado un mejor comportamiento de lo estimado respecto a lo medido como se observa en la Figura 13.

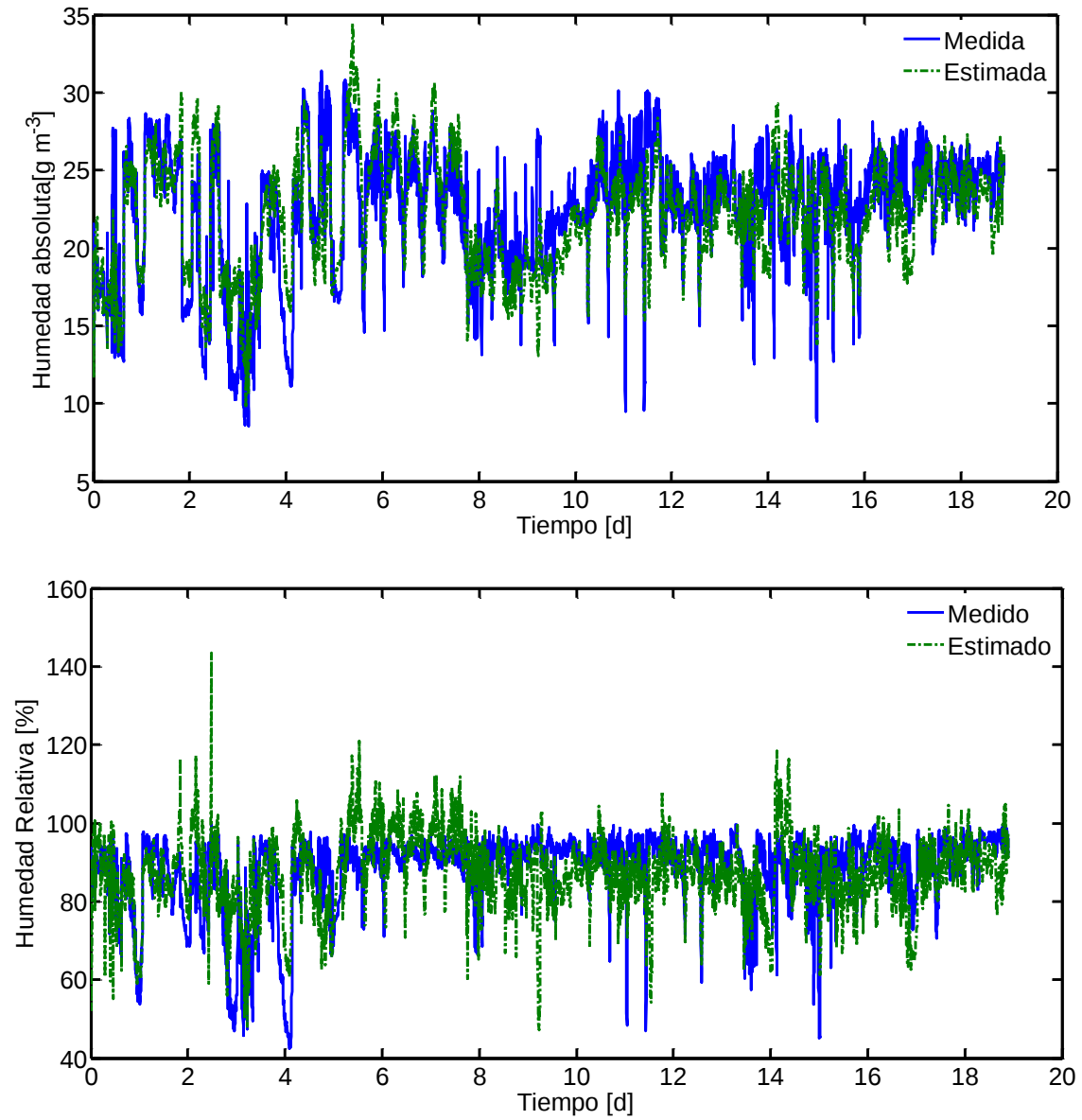


Figura 13. Humedad absoluta y relativa medidas (azul) y estimadas (verde) con parámetros óptimos después de la calibración del modelo 2 (9 de marzo al 4 de julio del 2012).

Resumiendo los resultados obtenidos del modelo 2 antes y después de la calibración, se presenta el Cuadro 7 en donde se tiene las medidas de ajuste tanto inicial como final, así como los valores de los parámetros obtenidos después de la calibración.

Cuadro.7. Medidas de ajuste y valores óptimos de los parámetros después de la calibración del modelo 2.

Valor nominal	Medidas de ajuste inicial	Rango de variación	Valor óptimos después de la calibración	Medidas de ajuste final
$\lambda = 2540$		$1016 < \lambda < 2540$	$\lambda = 2539.6$	
$k = 0.7$	MSE=27.997	$0.665 < k < 0.7$	$k = 0.7$	MSE=8.0729
$L_1 = 3.2$	RMSE=5.291	$1.28 < L_1 < 3.2$	$L_1 = 1.3$	RMSE=2.8413
$n_v = 20$	MAE=4.5210	$16 < n_v < 17$	$n_v = 16.6$	MAE=2.1946
$A_s = 307.2$	$r^2 = -0.5331$	$291.84 < A_s < 307.2$	$A_s = 307.2$	$r^2 = 0.7278$
$L_2 = 0.8$	RMAE=0.202	$0.64 < L_2 < 0.68$	$L_2 = 0.7$	RMAE=0.0977
$r_b = 150$		$90 < r_b < 95$	$r_b = 92.5$	
MSE = Error cuadrado medio, RMSE = Raíz del error cuadrado medio, MAE = Error absoluto medio, r^2 = Coeficiente de determinación, RMAE = Error absoluto medio relativo.				

Se implementó el modelo calibrado para 7 días con la finalidad de observar a mayor detalle el ajuste que se logró después de la calibración, los resultados se presentan en las Figuras 14 y 15.

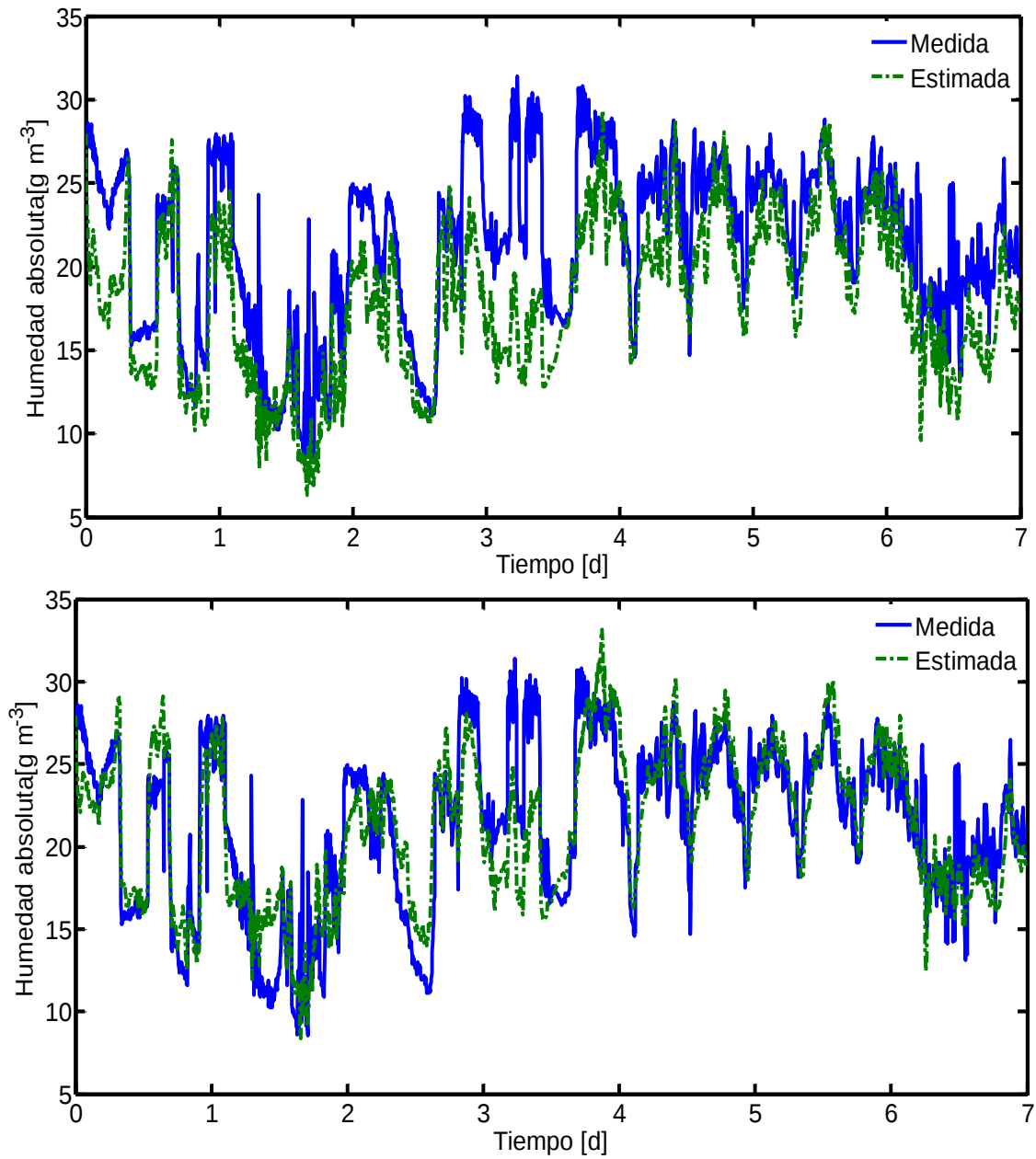


Figura 14. Humedad absoluta antes y después de la calibración (considerando 7 días del mes de mayo del 2012).

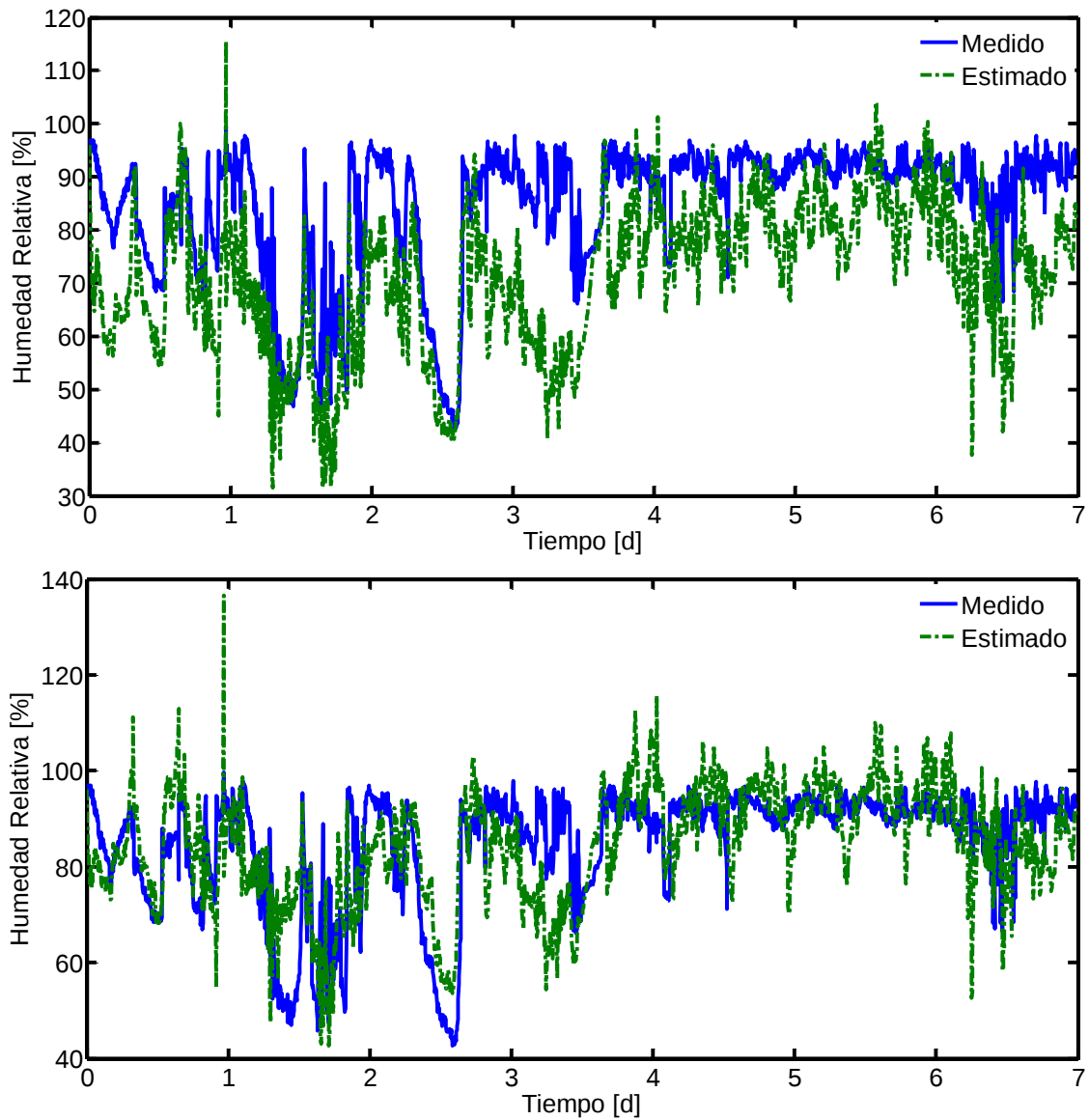


Figura 15. Humedad relativa antes y después de la calibración (considerando 7 días del mes de mayo del 2012).

CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrollaron dos modelos dinámicos que describen el comportamiento de la humedad dentro de un invernadero cerrado y semicerrado. El primer modelo de simulación describe el comportamiento de la humedad absoluta y relativa, cuando el invernadero está completamente cerrado, por lo que únicamente los fenómenos de transpiración y condensación se encuentran presentes.

Después de la calibración del primer modelo, se pudo mejorar un poco el desempeño. El ajuste de la humedad absoluta en comparación con la humedad relativa es mejor de acuerdo a los valores de los índices estadísticos.

El primer parámetro, el coeficiente del volumen del aire dentro del invernadero respecto a la superficie del mismo (h) tiene un valor de 6.7 m en el invernadero bajo estudio, y después de la calibración se obtuvo un valor óptimo para h de 5 m, lo cual indica que el modelo aquí presentado podría funcionar mejor en un invernadero con menor altura.

Para el segundo parámetro, la resistencia de la capa límite de la hoja (r_b), Bontsema, et al. (2007) proponen un valor de 200 sm^{-1} y el valor que se obtuvo en el modelo, después de la calibración fue de 100 sm^{-1} . El valor de la resistencia de la capa límite de la hoja (r_b) depende en gran medida de la velocidad del viento y de aspectos morfológicos de la hoja.

El coeficiente de extinción de la radiación (k) con un valor entre 0.5 y 0.8 propuesto por Carranza et al. (2008), disminuyó a 0.4 después de la calibración del modelo 1.

El valor óptimo después de la calibración del coeficiente de transmisividad de la luz ($\tau=0.7$) coincide con lo reportado por Van Beveren et al. (2014).

El modelo 1 puede ser utilizado para simular el comportamiento de la humedad absoluta y relativa dentro del invernadero cerrado, lo cual es importante para analizar en qué etapa de crecimiento de la planta se tiene mayor variación de la humedad y los factores atribuibles a ello.

El segundo modelo describió el comportamiento de la humedad absoluta y relativa en un invernadero semicerrado, cuando existe ventilación natural con diferente ángulo de apertura de las ventanas, en tal caso además del fenómeno de transpiración y condensación se considera la ventilación. Debido a que en el segundo modelo se incrementó el número de parámetros, fue necesario realizar el análisis de sensibilidad para saber que parámetros tenían mayor importancia en el modelo.

El análisis de sensibilidad se realizó para los parámetros: calor latente de vaporización del agua (λ), coeficiente de extinción de la radiación (k), longitud de la ventana (L_1), número de ventanas (n_v), área del suelo del invernadero (A_s), ancho de la ventana (L_2) y resistencia de la capa límite de la hoja (r_b), pendiente del techo (γ), transmisividad de la luz (τ).

De los resultados del análisis de sensibilidad se obtuvo que para siete parámetros de los nueve considerados en el modelo, los índices de sensibilidad son elevados, de ahí que se decidió realizar la calibración de los parámetros: calor latente de vaporización del agua (λ), coeficiente de extinción de la radiación (k), longitud de ventanas (L_1), número de ventanas (n_v), área del suelo del invernadero (A_s), ancho de ventanas (L_2) y resistencia de la capa límite de la hoja (r_b).

Los índices estadísticos de la calibración indicaron que la estimación de los parámetros mejora la calidad predictiva del modelo, obteniéndose un mejor ajuste entre los datos simulados y los datos medidos de la humedad absoluta y relativa.

Para el calor latente de vaporización del agua (λ) se utilizó un valor de 2540 Jg⁻¹ (Van Beveren et al., 2014), y después de la calibración se obtuvo un valor óptimo de 2539.6 Jg⁻¹. En el caso del coeficiente de extinción de la radiación (k) se utilizó un valor de 0.8 como valor inicial, después de la calibración se obtuvo un valor óptimo de 0.7, no vario mucho respecto a lo propuesto por Carranza et al. (2008), debido a que se tenía ventilación natural. Respecto a la longitud de ventanas (L_1) el invernadero tiene un valor de 3.2 m y después de la calibración se obtuvo un valor óptimo de 1.3 m; en cuanto al número de ventanas (n_v) se tenía un valor de 20 y este fue reducido a 16.6 después de la calibración, para el ancho de la ventana (L_2) se tenía un valor inicial de 0.8 m y con la calibración se obtuvo un valor óptimo de 0.7 m.

Los resultados anteriores sugieren que el modelo propuesto puede tener un mejor desempeño en un invernadero con menor área de ventilación.

En cuanto al área del suelo del invernadero (A_s) el valor inicial de 307.2 m^2 se mantuvo constante después de la calibración.

La resistencia de la capa límite de la hoja (r_b) paso de un valor de 200 sm^{-1} propuesto por Bontsema et al. (2007) a 92.5 sm^{-1} después de la calibración, esto se atribuye a la velocidad del viento.

Los resultados después de la calibración muestran que el modelo simula de manera aceptable la humedad en el invernadero y por lo tanto puede utilizarse para el análisis del comportamiento de la humedad cuando el invernadero se maneja con ventilación natural, también nos proporciona una idea de lo que sucede cuando se abren las ventanas en periodos de cortos de tiempo.

Comparando el desempeño de los dos modelos se puede concluir que el segundo modelo tiene un mejor desempeño en la simulación de la humedad.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdi, H. 2004. Least Squares. In: Lewis-Beck, M. S., A. Bryman, and T. Futing (eds.). The SAGE encyclopedia of social sciences research methods. California, USA. 2:559-561.
- Allen, R. G., L. S. Pereira., D. Raes y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, Italia: FAO. Riego y Drenaje 56. 298 p.
- Antón A., J. I. Montero., y P. Muñoz. 2003. Necesidades de agua del cultivo de tomate en invernadero. Comparación con el cultivo al aire libre. IRTA, proyecto de investigación INIA SC00 080 C2. Barcelona, España. Disponible en World Wide Web: <http://biblioteca.idict.villaclara.cu/UserFiles/File/CI%20Cultivos%20en%20invernaderos/24.pdf>.
- Arkebauer, T. J., A. Weiss., T. R. Sinclair., and A. Blum. 1994. In defense of radiation use efficiency: a response to Demetriades-Shah et al. (1992). Agric. For. Meteorol. 68, 221–227.
- Azcón B. J., y M. Talón. 2000. Fundamentos de Fisiología Vegetal. Interamericana McGraw-Hill, España.
- Baille, M., A. Baille., and D. Delmon. 1994. Microclimate and transpiration of greenhouse rose crops. Agricultural and Forest Meteorology 71: 83-9.

- Bailey, B. J. 2000. Constraints, limitations and achievements in greenhouses natural ventilation. *Acta Hortic.* 534: 21-30.
- Baptista, F. J., B. J. Bailey., J. M. Randall., and J. F. Meneses. 1999. Greenhouse ventilation rate: theory and measurement with tracer gas techniques. *J. Agric. Engng. Res.* 72: 363-374.
- Baptista, F. J., B. J. Bailey., and J. F. Meneses. 2001. Natural ventilation of greenhouses: comparison of measured and predicted ventilation rates. *Agribuilding 3-6*, September 2001. Campinas, S.P. Brasil.
- Baptista, F. 2007. Modelling the climate in unheated tomato greenhouses and predicting *Botrytis Cinerea* infection. PhD Thesis. Universidad de Évora.
- Berninger, E. 1989. Cultures florales de serre en zone méditerranéenne française: Eléments climatiques et physiologiques. Ed. INRA, PHM-*Revue Horticole*. Paris.
- Brun, F., D. Makowski., D. Wallach., and J. W. Jones. 2013. Working with dynamic models: Methods, Tools, and Examples for Agriculture and Environment, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Bontsema, J., J. Hemming., C. Stanghellini., P. De Visser., E. J. Van Henten., J. Budding., T. Rieswijk, and S. Nieboer. 2007. On-line monitoring van transpiratie en fotosynthese activiteit. Nota 451. Wageningen UR GL astuinbouw, Wageningen. The Netherlands. 78 p.
- Bot, G. P. A. 1983. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic Model. Ph. D. Dissertation, Agricultural University of Wageningen. The Netherlands.

- Boulard, T., and D. Baille. 1995. Natural ventilation of a greenhouse with continuous vents: measurements and data analysis. *J. Agric. Eng. Res* 61(1):27-36.
- Boulard, T., J. F. Meneses., M. Mermier., and G. Papadakis. 1996. The mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouses. *Agric. Forest Meteorol.* 79:61-77.
- Boulard, T., and S. Wang. 2000. Greenhouse crop transpiration model from external climate conditions. *Acta Hort.* (534): pp. 235-244.
- Buchholz, M., P. Jochum., and G. Zaragoza. 2006. Concept for water, heat and food supply from a closed greenhouse-the Watergy project. *Acta Hort.* 691:509-516.
- Castilla, P. N. 2007. Invernaderos de plástico. Tecnología y manejo. (Ed.) Mundi-Prensa, 2ª ed.
- Carranza, C., O. Lanchero., D. S. Miranda., M. R. Salazar y B. Chaves. 2008. Modelo simple de simulación de distribución de masa seca en brócoli (*Brassica* sp.) variedad Coronado y repollo (*Brassica oleracea*) híbrido Delus cultivados en la Sabana de Bogotá. *Agronomía Colombiana*, 26(1), 23-31.
- Cervantes, M. A. 2002. Ventilación en cultivos intensivos. Artículo obtenido de la página web www.infoagro.com. Consultado en diciembre del 2014.
- Cockshull, K. E. 1988. The integration of plant physiology with physical changes in the greenhouse climate. *Acta Hort.* 229, 113–123.

- Day, W. and B. J. Bailey. 1999. Physical principles of microclimate modification. In Greenhouse ecosystems. Stanhill G.; Enoch H.Z. (Ed.) Elsevier. Amsterdam. Netherlands: 71-96.
- De Jong, T. 1990. Natural ventilation of large multi-span greenhouses. Ph. D. Thesis, Wageningen. The Netherlands.
- De Wit, C.T. 1965. Photosynthesis of leaf canopies. Agric. Res. Rep. 663. Pudoc, Wageningen, 57 pp.
- FAO (Food and Agriculture Organization), 1991. Protected Cultivation in the Mediterranean Climate. Plant Protection Paper [on line]. FAO, pp. 90-317. World Wide Web: http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0365-28072001000400010&script=sci_arttext
- Fernández, R. E. y F. Camacho. 2005. Eficiencia en el uso del agua. Revista Viveros. Universidad de Almería en España, pp. 86-89.
- Giacomelli Gene, A. 1998. Differences among light transmission tests within the laboratory, within short and long-duration studies, on artificial testing stands, and within a greenhouse structure with a plant crop. Greenhouse Glazing & Solar Radiation Transmission Workshop, October 1998. Center for Controlled Environment Agriculture. Rutgers University, Cook College.
- Goudriaan, J. 1988. The bare bones of leaf angle distribution in radiation models for canopy photosynthesis and energy exchange. Agric. For. Meteorology. 43, 155–169.
- Goudriaan, J., and H.H. Van Laar. 1994. Modeling Potential Crop Growth Processes. Kluwer Acad. Publishers, Dordrecht, 238 pp.

- Hernández, J., G. Hernández., T. Soriano., M. I. Morales., J. Escobar., y N. Castilla. 2003. La orientación de un invernadero y la geometría de su cubierta determinan la transmisividad global a la radiación solar. *Actas de Horticultura*, n.39: pp. 379.
- Heuvelink, E. 1996. Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis. Dissertation. Wageningen Agric. Univ., Wageningen, 326 pp.
- Jarvis, P. G. 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Phil. Trans. Roy. Soc. London, B*, 273:593-610.
- Jolliet, O., and B. J. Bailey. 1992. The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses: measurements and models comparison. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58: 43-62.
- Jolliet, O. 1994. HORTITRANS, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses. *J. Agric. Eng. Res.* 57: 23-37.
- De Jong, 1990. Natural ventilation of large multi-span greenhouse. Thesis. Agric. University Wageningen.
- Kittas, C., T. Boulard, and G. Papadakis, 1997. Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings: sensitivity to temperature and wind effects. *Transactions of the ASAE*. 40(2): 415-425.
- Lee, W. F. 2010. Cooling Capacity Assessment of Semi-closed Greenhouses. Ph. D. Thesis, Ohio State University.
- Li, Y. L., C. Stanghellini., and H. Challa. 2001. Effect of electrical conductivity and transpiration on production of greenhouse Tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *ScientiaHorticulturae* 88; 11.

- Madsen, K., H. B. Nielsen., and O. Tingleff. 2004. Methods for non-linear least squares problems. 2a. Ed. Technical University of Denmark. 58 p.
- Marcelis L. F. M., E. Heuvelink., and J. Goudriaan. 1998. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae* 74: 83-111.
- Meneses J. F., and J. R. Raposo. 1987. Ventilação natural de instalações agrícolas: teoria e métodos de cálculo (Natural ventilation of animal housings: theory and methods of calculation). *Anais do Instituto Superior de Agronomia*, 249-265
- Monsi, M., and T. Saeki. 1953. U"ber den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung fu"r die Stoffproduktion. *Soc. Jpn. J. Bot.* 14, 22–52.
- Monteith, J. L. and M. H. Unsworth. 1990. *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold, London, 291 pp.
- Monteith, J. L. 1994. Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass. *Agricultural and Forest Meteorology* 68:213-220.
- Montero, J. I., A. Antón., J. Hernández, and N. Castilla. 2001. Direct and diffuse light transmission of insect proof screens and plastic films for cladding greenhouses. *Acta Hort. (ISHS)* 559: pp. 203-210.
- Montero, J. I., C. Stanghellini., and N. Castilla. 2008, Invernadero para la producción sustentables en áreas de clima de invernadero suave, IFAPA Granada. www.horticom.com/revistasonline/horticultura/rhi65/12_27.pdf. Consultado en junio del 2014.

- Morisot, A. 1996. A first step to validating 'PP. Rose', an empirical model of the potential production of cut roses. *Acta Hortic.* 417, 127–138.
- Namesny, A. 2009. Tecnología de producción en Invernaderos, superando la frontera de los 100 kg/m².
[file:///C:/inetpub/wwwroot/Greenhouse/2007/talks/Talks- 2002/2002-Talk-Boonekamp-2.h...](file:///C:/inetpub/wwwroot/Greenhouse/2007/talks/Talks-2002/2002-Talk-Boonekamp-2.h...) 19/09/2007. Consultado en agosto del 2014.
- Papadakis, G., M. Mermier., J. F. Meneses., and T. Boulard. 1996. Measurement and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings. *J. Agric. Eng. Res.* 63:219-228.
- Pérez, J., M. Berenguel., F. Rodríguez., and A. A. Ramírez. 2006. Ventilation rate models of mediterranean greenhouses for control purposes. *Acta Hortic.* 719:197-204.
- Prenger, J. J., R. P. Fynn, and R. C. Hansen. 2002. A comparison of four evapotranspiration models in a greenhouse environment. *Transactions of the ASABE.* 45: 1779-1788.
- Ross, J. 1975. Radiative transfer in plant communities. In: J.L. Monteith (Ed), *Vegetation and the atmosphere.* Academic Press, London: 13-55.
- Ross, J. 1981. *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands.* Dr Junk Publishers, The Hague, 391pp.
- Roy, J. C., T. Boulard., C. Kittas., and S. Wang. 2002. Convective and ventilation transfer in greenhouses, Part 1: the greenhouse considered as a perfectly stirred tank. *Biosys. Eng.* 83(1):1-20.

- Ruiz, G. A. 2009. Modelos para simulación y control del clima de un invernadero con ventilación natural. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Salazar, M. R., A. Rojano A., y I. L. López C. 2014. La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. Tecnología y Ciencias del Agua, vol. V, núm. 2, pp. 177-183.
- Saltelli, A. 2002. Sensitivity analysis for importance assessment. Risk Anal., vol. 22, p.579-590
- Saltelli, A., K. Chan, y E. M. Scott. Eds. 2000. Sensitivity Analysis. John Wiley & Sons Ltd. Chichester.
- Speetjens, S. L. 2008. Towards Model Based Adaptive Control for the Watergy Greenhouse-Design and Implementation. Ph.D. thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
- Spitters, C. J. T. 1986. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modelling canopy photosynthesis: II. Calculation of canopy photosynthesis. Agric. For. Meteorol. 38, 231–242.
- Stanghellini, C. 1987. Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management. Ph.D. Dissertation, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 150 pp.
- Stanghellini, C., and J. A. Bunce. 1993. Response of photosynthesis and conductance to light, CO₂, temperature and humidity in tomato plants grown at ambient and elevated CO₂. Photosynthetica, 29(4): 487-497.
- Stanghellini, C. and T. de Jong. 1995. A model of humidity and its applications in a greenhouse. Agric. For. Meteorol., 76:129-148.

- Stanghellini, C., and Th. M. Van Meurs W. 1992. Environmental control of greenhouse crop transpiration. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 51: 297-311.
- Stanhill, G., and J. Sholte-Albers. 1974. Solar radiation and water loss from glasshouse roses. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 99(2):107-110.
- Tap, F. 2000. Economics-based optimal control of greenhouse tomato crop production. Ph.D. Thesis, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Taiz, L., y E. Zeiger. 2006. *Fisiología vegetal.*, vol. 1, Castelló de la Plana: publicacions de la universitat Jaume I.
- Van Beveren, P. J. M., J. Bontsema., G. Van Straten., and E. Van Henten. 2014. Minimal heating and cooling in a modern rose greenhouse. *Applied energy* 137 (2014). - ISSN 0306-2619 - p. 97 - 109.
- Van Henten, E. J., and G. Van Straten. 1994. Sensitivity analysis of a dynamic growth model of lettuce. *Journal of Agricultural Engineering Research* 59:19-31.
- Willmott, C. J., y K. Matsuura. 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Clim. Res.* 30, 79_82.
- Zabeltitz, C. V. 1998. Greenhouse structures. En G. Stanhill y H. Z. Enoch (eds.), *Ecosystems of the World*, 20: greenhouse ecosystems. Amsterdam: Elsevier: pp. 17-69.

APÉNDICE

Apéndice A. NOTACIÓN

Símbolo	Descripción	Unidades SI
g_E	Conductancia de la transpiración	$m\ s^{-1}$
LAI	Índice de área foliar del cultivo	-
ε	Relación del calor latente y contenido de calor Sensible del aire saturado	-
r_b	Resistencia de la capa límite de la hoja	sm^{-1}
r_s	Resistencia estomática	sm^{-1}
τ	Coeficiente de transmisividad de la cubierta	-
e_{si}	Presión del vapor a saturación dentro del invernadero	Pa
e_i	Presión de vapor dentro del invernadero	Pa
$\chi_{cultivo}$	Concentración de vapor de agua del aire en el cultivo	gm^{-3}
χ_a^*	Concentración de vapor de agua saturado	gm^{-3}
χ_a	Concentración de vapor de agua absoluta del aire en el invernadero	(gm^{-3})
R_n	Radiación neta de cultivos	Wm^{-2}
I_s	Radiación solar en el exterior	Wm^{-2}
λ	Calor latente de vaporización del agua	Jg^{-1}
RH	Humedad relativa	%
h	Coeficiente del volumen del aire dentro del invernadero respecto a la superficie del mismo	m
g_C	Conductancia de la condensación	$m\ s^{-1}$
T_a	Temperatura del aire dentro del invernadero	$^{\circ}C$
T_{ext}	Temperatura externa del aire	$^{\circ}C$
T_{cub}	Temperatura de la cubierta	$^{\circ}C$
T_{ae}	Temperatura del agua en la entrada del intercambiador de calor	$^{\circ}C$
T_{as}	Temperatura del agua en la salida del intercambiador de calor	$^{\circ}C$
T_{inter}	Temperatura del intercambiador de calor	$^{\circ}C$
$\Phi_{C,inter}$	Condensación en el intercambiador de calor	$gm^{-2}s^{-1}$
χ_{inter}^*	Humedad a saturación en el intercambiador de calor	gm^{-3}
k	Coeficiente de extinción de la radiación	-
g_V	Ventilación específica	$m^3m^{-2}s^{-1}$
ϕ_{lek}	Infiltración	m^3s^{-1}
ϕ_{win}	Ventilación a través de las ventanas	m^3s^{-1}
χ_{ext}	Concentración de vapor de agua en el aire externo	gm^{-3}

Símbolo	Descripción	Unidades SI
V_o	Velocidad inicial del viento	$m\ s^{-1}$
d	Dimensión de la hoja	m
f_a	Factor de infiltración	
φ_{wind}	Velocidad del viento dentro del invernadero	$m\ s^{-1}$
$\varphi_{dT_{lsd}}$	Ventilación sotavento debido ΔT entre el interior y exterior	m^3s^{-1}
f_{lsd}	Ventilación sotavento	m^3s^{-1}
$\varphi_{dT_{wsd}}$	Ventilación barlovento debido ΔT entre interior y exterior	m^3s^{-1}
f_{lsd}	Ventilación sotavento	m^3s^{-1}
$fr_{window_{lsd}}$	Número de ventanas para la ventilación a sotavento por metro cuadrado de suelo	m^{-2}
f_{wsd}	Ventilación barlovento	m^3s^{-1}
$L_{win_{lsd}}$	Longitud de la abertura vertical de la ventana en el lado de sotavento	m
$L_{win_{wsd}}$	Longitud de la abertura vertical de la ventana en el lado de barlovento	m
Ap_{lsd}	Número de ventanas sotavento	
Ap_{wsd}	Número de ventanas barlovento	
$c_{01}, c_{11}, c_{12}, c_{21}, c_{22}, c_{31}, c_{32}$	Coeficientes empíricos	-
γ	Pendiente del techo	grados, °
γ_{rad}	Pendiente del techo	rad
θ_{max}	Ángulo de apertura la ventana	grados, °

Apéndice B. PROGRAMA PRINCIPAL EN MATLAB PARA LA SIMULACIÓN DE LA HUMEDAD EN UN INVERNADERO CERRADO (MODELO 1)

```
% MODELO 1: SIMULACIÓN DE LA HUMEDAD EN UN INVERNADERO CERRADO
% Programa elaborado por el Dr. Irineo López Cruz y Dra. Raquel
% Salazar Moreno, adaptado por Azucelli Maythe Mauricio Pérez
% Tesis de Maestría de Azucelli Maythe Mauricio Pérez
% Posgrado IAUIA, Universidad Autónoma Chapingo
% Chapingo México, Septiembre de 2012.

variables12=xlsread('SinventSinneb.xlsx',1,'A11509:Z28986');
TiempoSim=variables12(:,1);

Tin=variables12(:,4); % Temperatura interna [° C]
Tout=variables12(:,6); % Temperatura externa [° C]
RHin=variables12(:,12); % Humedad relativa interna [%]
Radin=variables12(:,14); % Radiación interna [Wm-2]
LAI=variables12(:,17); % Índice del área foliar del cultivo [-]
VPD=variables12(:,24); % Déficit de presión del vapor
Tcover=variables12(:,8); % Temperatura de la cubierta [° C]

Va=2058.24; % Volumen total del invernadero [m3]
h=6.7; % Volumen del aire en el invernadero/Superficie del
invernadero [m]
As=307.2; % Área del suelo [m2]
Aa=684.48; % Área de la superficie de la cubierta del invernadero
[m2]
RB=200; Resistencia de la capa límite de la hoja [sm-1]
GAMMA=0.8; % Coeficiente de extinción de la radiación solar
KEXT=0.7; % Coeficiente de transmisividad de la cubierta.
LATHEAT=2540; % Calor latente de vaporización del agua [Jg-1]
Cpa=0.007614864; % Capacidad de calor específico, calculado
[J/mgK]
Patm=101324.9; % Presión atmosférica, Berlín [Pa]
Kcba=0.1192699; % Coeficiente de transferencia de masa [Wm2K-1]
MWratio=0.622; % Radio de humedad: Relación entre peso molar de
vapor de agua y aire seco.

%Función para el tiempo de simulación
TimeSim=zeros(numel(TiempoSim),1);

TimeSim(1)=0;
```

```

for i=1:numel(TiempoSim)-1
    if TiempoSim(i+1) < TiempoSim(i)
        TimeSim(i+1)=TimeSim(i)+3600*(24+(TiempoSim(i+1)-
TiempoSim(i)));
    else
        TimeSim(i+1)=TimeSim(i)+3600*(TiempoSim(i+1)-
TiempoSim(i));
    end
end

TimeSim2=TimeSim(1:end);
Tin2=Tin(1:end);
Tout2=Tout(1:end);
Tcover2=Tcover(1:end);
RHin2=RHin(1:end);
Radin2=Radin(1:end);
LAI2=LAI(1:end);
VPD2=VPD(1:end);

X_abs_in=zeros(numel(RHin2),1);
for i=1:numel(RHin2)
    X_abs_in(i)=RH_to_X_abs(Tin2(i),RHin2(i));
end

x10=X_abs_in(1);

TU=[TimeSim2 Tin2 Tout2 Tcover2 LAI2 Radin2 ];
Opciones=simset('solver','ode45','reltol',1e-10,'abstol',1e-12);
[t,x,y]=sim('huabsh1',TimeSim2,Opciones,TU);

figure (1);
plot(TimeSim2/(3600*24),X_abs_in,'b',t/(3600*24),x,'g-.');
xlabel('Tiempo [dias]')
ylabel('Humedad Absoluta[g m^-^3]');
legend('Medida','Estimada');
RHest=X_abs_to_RH(Tin2,x);
figure(2);
plot(TimeSim2/(3600*24),RHin2,'b',t/(3600*24),y(:,2),'g-.');
xlabel('Tiempo [dias]')
ylabel('Humedad Relativa [%]');
legend('Medida','Estimada');

```

Apéndice C. PROGRAMA EN MATLAB PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO 1

```
% CALIBRACIÓN DEL MODELO 1
% Programa elaborado por el Dr. Irineo López Cruz y Dra. Raquel
% Salazar Moreno, adaptado por Azucelli Maythe Mauricio Pérez
% Tesis de Maestría de Azucelli Maythe Mauricio Pérez
% Posgrado IAUIA, Universidad Autónoma Chapingo
% Chapingo México, Septiembre de 2012.

global TU X_abs_in TimeSim
global x10 CH2O RB GAMMA KEXT
warning('off')

variables12= xlsread('SinventSinneb.xlsx',1,'A28987:Z42973');

Tin=variables12(:,4); % Temperatura interna [° C]
Tout=variables12(:,6); % Temperatura externa [° C]
RHin=variables12(:,12); % Humedad relativa interna [%]
Radin=variables12(:,14); % Radiación interna [Wm-2]
LAI=variables12(:,17); % Índice del área foliar del cultivo [-]
VPD=variables12(:,24); % Déficit de presión del vapor
Tcover=variables12(:,8); % Temperatura de la cubierta [° C]

Va=2058.24; % [m3] Volumen total del invernadero
h=6.7; % [m] Volumen del aire en el invernadero/Superficie del
invernadero
As=307.2; % Área del suelo [m2]
Aa=684.48; % Área de la superficie de la cubierta del
invernadero [m2]
RB=200; Resistencia de la capa límite de la hoja [sm-1]
GAMMA=0.8; % Coeficiente de extinción de la radiación solar
KEXT=0.7; % Coeficiente de transmisividad de la cubierta.
LATHEAT=2540; % Calor latente de vaporización del agua [Jg-1]
Cpa=0.007614864; % [Jmg-1K-1] Capacidad de calor específico,
calculado
Patm=101324.9; % [Pa] Presión atmosférica, Berlín.
Kcba=0.1192699; % Coeficiente de transferencia de masa [Wm2K-1]
MWratio=0.622; %Radio de humedad: Relación entre peso molar de
vapor de agua y aire seco.
X_abs_in=zeros(numel(HR),1);
for i=1:numel(HR)
    X_abs_in(i)=RH_to_X_abs(Temperaturac(i),HR(i));
```

```

end
x10=X_abs_in(1);

TimeSim=zeros(numel(TiempoSim),1);
TimeSim(1)=0;
for i=1:numel(TiempoSim)-1
    if TiempoSim(i+1) < TiempoSim(i)
        TimeSim(i+1)=TimeSim(i)+3600*(24+(TiempoSim(i+1)-
TiempoSim(i)));
    else
        TimeSim(i+1)=TimeSim(i)+3600*(TiempoSim(i+1)-
TiempoSim(i));
    end
end
TU=[TimeSim  Temperaturac TempExt TempCub LAI RadInt ];
Opciones=simset('solver','ode45','reltol',1e-10,'abstol',1e-12);
[t,x,y]=sim('huabsh1',TimeSim,Opciones,TU);

figure(1);
plot(TimeSim/(3600*24),X_abs_in,'',t/(3600*24),x(:,1),'-');
xlabel('Tiempo [d]')
ylabel('Humedad absoluta[mg/m3]');
legend('Medida','Estimada');

figure(2);
plot(TimeSim/(3600*24),HR,'',t/(3600*24),y(:,2),'-');
xlabel('Tiempo [d]')
ylabel('Humedad relativa[%]');
legend('Medida','Estimada');

disp('Statistics before calibration:');
MSE=((x(:,1)-X_abs_in)'*(x(:,1)-X_abs_in))/numel(X_abs_in)
RMSE=sqrt(MSE)
MAE=sum(abs((x(:,1)-X_abs_in)))/numel(X_abs_in)

ymed=mean(X_abs_in);
ymedest=mean(x(:,1));
EF=1-((x(:,1)-X_abs_in)'*(x(:,1)-X_abs_in))/((X_abs_in-ymed)'*(X_abs_in-ymed))

% Relative statistics
varmed=sqrt((1/numel(X_abs_in)-1)*((X_abs_in-ymed)'*(X_abs_in-ymed)));
varest=sqrt((1/numel(x(:,1))-1)*((x(:,1)-ymedest)'*(x(:,1)-ymedest)));
covmedest=(1/numel(X_abs_in)-1)*((x(:,1)-ymed)'*(X_abs_in-ymedest));
coefcorr=covmedest/(varmed*varest)

RMAE=MAE/((1/numel(X_abs_in))*sum(abs(X_abs_in)))

fname='Evalhumidity1';

```

```

options=optimset('MaxIter',20000,'Display','Iter','MaxFunEvals',
80000);
h=6.7; % [m] Volumen del aire en el invernadero/Superficie del
invernadero
RB=200; Resistencia de la capa límite de la hoja [sm-1].
GAMMA=0.8; % Coeficiente de extinción de la radiación solar.
KEXT=0.7; % Coeficiente de transmisividad de la cubierta.
Params=[CH2O,RB,GAMMA,KEXT];
xmin=[5,100,0,0.6]; % Lower limit of the control variable.
(Used only for initialization)
xmax=[10,150,0.4,0.8]; % Upper limit of the control variable.
(Used only for inicializacion)

[X,RESNORM,RESIDUAL,EXITFLAG,OUTPUT,LAMBDA,JACOBIAN]=lsqnonlin(f
name,Params,xmin,xmax,options);
h=X(1);
RB=X(2);
GAMMA=X(3);
KEXT=X(4);
Opciones=simset('solver','ode45','reltol',1e-10,'abstol',1e-12);
[t,x,y]=sim('huabsh1',TimeSim,Opciones,TU);

figure(1);
plot(TimeSim/(3600*24),X_abs_in,'',t/(3600*24),x(:,1),'-');
xlabel('Tiempo [días]');
ylabel('Humedad absoluta [mg m-3]');
legend('Medida','Estimada');

figure(2);
plot(TimeSim/(3600*24),HR,'',t/(3600*24),y(:,2),'-');
xlabel('Tiempo [días]');
ylabel('Humedad relativa [%]');
legend('Medida','Estimada');

disp('Statistics after calibration: ');
MSE=((x(:,1)-X_abs_in)'*(x(:,1)-X_abs_in))/numel(X_abs_in)
RMSE=sqrt(MSE)
MAE=sum(abs((x(:,1)-X_abs_in)))/numel(X_abs_in)
ymed=mean(X_abs_in);
ymedest=mean(x(:,1));
EF=1-((x(:,1)-X_abs_in)'*(x(:,1)-X_abs_in))/((X_abs_in-
ymed)'*(X_abs_in-ymed))
% Relative statistics
varmed=sqrt((1/numel(X_abs_in)-1)*((X_abs_in-ymed)'*(X_abs_in-
ymed)));
varest=sqrt((1/numel(x(:,1))-1)*((x(:,1)-ymedest)'*(x(:,1)-
ymedest)));
covmedest=(1/numel(X_abs_in)-1)*((x(:,1)-ymed)'*(X_abs_in-
ymedest));
coefcorr=covmedest/(varmed*varest)
RMAE=MAE/((1/numel(X_abs_in))*sum(abs(X_abs_in)))

```

Apéndice D. PROGRAMA PRINCIPAL EN MATLAB PARA LA SIMULACIÓN DE LA HUMEDAD EN UN INVERNADERO SEMI-CERRADO (MODELO 2)

```
% MODELO 2: SIMULACIÓN DE LA HUMEDAD EN UN INVERNADERO SEMI-
CERRADO
% programa elaborado por el Dr. Irineo López Cruz y Dra. Raquel
% Salazar Moreno, adaptado por Azucelli Maythe Mauricio Pérez
% Tesis de Maestría de Azucelli Maythe Mauricio Pérez
% Posgrado IAUIA, Universidad Autónoma Chapingo
% Chapingo México, Noviembre de 2012.

variables12= xlsread('conventsinnb.xlsx',1,'A2:Z5445');
TiempoSim=variables12(:,1);

Tin=variables12(:,4);% Temperatura interna [° C]
Tout=variables12(:,6);% Temperatura externa [°C]
Tcover=variables12(:,8);% Temperatura de la cubierta [° C]
RHin=variables12(:,12);% Humedad relativa interna [%]
RHout=variables12(:,13);% Humedad relativa externa [%]
Radin=variables12(:,14);% Radiación interna [Wm-2]
LAI=variables12(:,17);% Índice del área foliar del cultivo [-]
WindVel=variables12(:,18);% Velocidad del viento [ms-1]
VPD=variables12(:,24);% Déficit de presión del vapor
WindowLsd=variables12(:,2);% Apertura de la ventana a sotavento
[%]
WindowWsd=variables12(:,2);% Apertura de la ventana a
barlovento [%]

Va=2058.24; % [m3] Volumen total del invernadero
h=6.7; % Volumen del aire en el invernadero/Superficie del
invernadero [m]
As=307.2; % Área del suelo [m2]
Aa=684.48;% Área de la superficie de la cubierta del invernadero
[m2]
RB=200; % Resistencia de la capa límite de la hoja [sm-1]
GAMMA=0.8; % Coeficiente de extinción de la radiación solar
KEXT=0.7; % Coeficiente de transmisividad de la cubierta del
invernadero
LATHEAT=2540; %Calor latente de vaporización del agua [Jg-1]
RHOAIR=1.225; %Densidad del aire (kgm3)
CPAIR=1000; %Capacidad de calor específico del aire (J/(Kg Kg))
NWINDOWS=20; %Número total de ventanas.
Windowlsd=12; % Número de ventanas a sotavento [adimensional]
```

```

Windowwsd=8; % Número de ventanas a barlovento [-]
SLOPE=24.9; % Pendiente-ángulo de la cresta [°]
AREAFLOOR=307.2; % Área del piso del invernadero [m²]
LWINDOW=3.2; % Largo de la ventana del invernadero [m]
WWINDOW=0.8; % Ancho de la ventana del invernadero [m]
Patm=101324.9; % Presión atmosférica, Berlín [Pa]
Kcba=0.11926622; % Radio de humedad: Relación entre peso molar de
vapor de agua y aire seco.

X_abs_in=zer99; % Coeficiente de transferencia de masa [Wm²K⁻¹]
MWratio=0.05(numel(RHin),1);
for i=1:numel(RHin)
    X_abs_in(i)=RH_to_X_abs(Tin(i),RHin(i));
end

x10=X_abs_in(1);
S10=0;

TimeSim=[0:300:5445*300]';

TU=[TimeSim Tin Tout Tcover RHout Radin LAI WindVel WindowLsd
WindowWsd];
Opciones=simset('solver','ode45','reltol',1e-10,'abstol',1e-12);
[t,x,y]=sim('hubabshv1s',TimeSim,Opciones,TU);
%RHest=X_abs_to_RH(Tin,x);

figure(1);
plot(t/(3600*24),x(:,1),TimeSim/(3600*24),X_abs_in,':');
xlabel('Tiempo [d]')
ylabel('Humedad absoluta [g m⁻³]');
legend('Estimado','Medido');

figure(2);
plot(t/(3600*24),y(:,2),TimeSim/(3600*24),RHin,':');
xlabel('Tiempo [d]')
ylabel('Humedad Relativa [%]');
legend('Estimado','Medido');

```

Apéndice E. ECUACIONES DE SENSIBILIDAD PARA EL MODELO 2

Estructura del modelo 2

Transpiración (E , $\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$):

$$E = g_E(\chi_{\text{cultivo}} - \chi_a) = f_1$$

Condensación (C , $\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$):

$$C = g_C[0.2522\exp(0.0485T_a)(T_a - T_{\text{ext}}) - (\chi_a^* - \chi_a)] = f_2$$

Ventilación (V , $\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$):

$$V = g_V(\chi_a - \chi_{\text{ext}}) = f_3$$

Ecuaciones de los procesos

$$g_E = \frac{2\text{LAI}}{(1 + \varepsilon)r_b + r_s}$$

$$\chi_{\text{cultivo}} = \chi_a^* + \varepsilon \frac{r_b}{2\text{LAI}} \frac{R_n}{\lambda}$$

$$\chi_a = \frac{\chi_a^* \text{RH}}{100}$$

$$\chi_o = \frac{5.5638 \exp(0.0572T_{\text{ext}}) \text{RH}}{100}$$

$$g_C \cong \max[0, 0.25^{-3}(T_a - T_{\text{cub}})^{1/3}]$$

$$\chi_a^* = 5.5638\exp(0.0572T_a)$$

$$g_V = (\varphi_{\text{lek}} + \varphi_{\text{win}})$$

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

$$r_b = \frac{1174d^{0.5}}{(d|T_c - T_a| + 207\phi_{wind}^2)^{0.25}}$$

$$r_s = 82 \left(\frac{4.3}{0.54} \right) \left[\text{Exp} \left(\frac{-kR_n}{2LAI} \right) \right] (1 + 0.023(T_a - 20)^2)$$

$$R_n = \tau(1 - \exp(-0.7LAI))I_s$$

$$RH = \frac{\chi_a}{\chi_a^*}(100)$$

$$\phi_{lek} = 0.000083 + 0.000035 * V_o * f_a$$

$$\phi_{win} = \sqrt{|\phi_{wind}^2 + (\phi_{dT_{lsd}} + \phi_{dT_{wsd}})^2|}$$

$$\phi_{wind} = (f_{lsd} * fr_{window_{lsd}} + f_{wsd} * fr_{window_{wsd}})V_o L_1 L_2$$

$$\phi_{dT_{lsd}} = (1/3)a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{ext} - T_a)}(fr_{window_{lsd}})(L_{win_{lsd}})^{1.5}$$

$$\phi_{dT_{wsd}} = (1/3)a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{ext} - T_a)}(fr_{window_{wsd}})(L_{win_{wsd}})^{1.5}$$

$$f_{lsd} = c31(Ap_{lsd})^3 - c21(Ap_{lsd})^2 + c11Ap_{lsd} + c01$$

$$fr_{window_{lsd}} = \frac{n_v}{A_s}$$

$$f_{wsd} = c32(Ap_{wsd})^3 - c22(Ap_{wsd})^2 + c12Ap_{wsd} + c02$$

$$fr_{window_{wsd}} = \frac{n_v}{A_s}$$

$$L_{win_{lsd}} = L_2(\sin(\gamma_{rad}) - \sin(\gamma_{rad} - (Ap_{lsd}/100)\theta_{max}))$$

$$L_{win_{wsd}} = L_2(\sin(\gamma_{rad}) - \sin(\gamma_{rad} - (Ap_{wsd}/100)\theta_{max}))$$

$$\gamma_{rad} = (\pi/180)(\gamma)$$

$$\theta_{max} = 50(2\pi)/360$$

Análisis de sensibilidad

Parámetros: Calor latente de vaporización del agua (λ), coeficiente de extinción de la radiación (k), longitud de ventanas (L_1), número de ventanas (n_v), área del suelo del invernadero (A_s), ancho de ventanas (L_2), resistencia de la capa límite de la hoja (r_b), pendiente en el techo (γ) y coeficiente de transmisividad de la cubierta (τ).

Calculo de la derivada de la función de estado con respecto al tiempo

$$\frac{\partial \chi_a}{\partial t} = E - C - V$$

$$\frac{\partial E}{\partial \chi_a} = \frac{\partial (g_E^*(\chi_{\text{cultivo}} - \chi_a))}{\partial \chi_a} = -g_E$$

$$\frac{\partial V}{\partial \chi_a} = \frac{\partial (g_V^*(\chi_a - \chi_{\text{ext}}))}{\partial \chi_a} = g_V$$

$$\frac{\partial C}{\partial \chi_a} = \frac{\partial \text{MAX}[0, G_C^*(\chi_a - \chi_a^*(T_{\text{cub}}))]}{\partial \chi_a} = \text{MAX}(0, g_C)$$

$$\frac{\partial \chi_a}{\partial t} = -g_E - g_V - \text{MAX}(0, g_C)$$

Sensibilidad a la resistencia aerodinámica o de la capa límite de la hoja (r_b)

$$\frac{\partial \chi_{\text{cultivo}}}{\partial r_b} = \frac{\varepsilon}{2LAI} \left(\frac{Rn}{\lambda} \right)$$

$$\frac{\partial g_E}{\partial r_b} = \frac{-2LAI(1+\varepsilon)}{[(1+\varepsilon)r_b + r_s]^2}$$

$$\frac{\partial E}{\partial r_b} = g_E \left[\frac{\partial (\chi_{\text{cultivo}} - \chi_a)}{\partial r_b} + (\chi_{\text{cultivo}} - \chi_a) \frac{\partial g_E}{\partial r_b} \right]$$

Sensibilidad al calor latente de vaporización del agua (λ)

$$\frac{\partial \chi_{\text{cultivo}}}{\partial \lambda} = \frac{\partial \left(\chi_a^* + \varepsilon \frac{r_b}{2LAI} \frac{R_n}{\lambda} \right)}{\partial \lambda}$$

$$\frac{\partial \chi_{\text{cultivo}}}{\partial \lambda} = - \frac{\varepsilon r_b R_n}{2LAI \lambda^2}$$

$$\frac{\partial E}{\partial \lambda} = g_E \left[\frac{\partial (\chi_{\text{cultivo}} - \chi_a)}{\partial \lambda} \right] + (\chi_{\text{cultivo}} - \chi_a) \left(\frac{\partial g_E}{\partial \lambda} \right)$$

Sensibilidad al Coeficiente de extinción de la radiación (k)

$$\frac{\partial r_s}{\partial k} = \frac{\partial \left[82 \left(\frac{4.3}{0.54} \right) \left[\text{Exp} \left(\frac{-k R_n}{2LAI} \right) \right] (1 + 0.023(T_a - 20)^2) \right]}{\partial k}$$

$$\frac{\partial r_s}{\partial k} = 82 \left(\frac{4.3}{0.54} \right) (1 + 0.023(T_a - 20)^2) \frac{\partial \text{Exp} \left(\frac{-k R_n}{2LAI} \right)}{\partial k}$$

$$\frac{\partial r_s}{\partial k} = 82 \left(\frac{4.3}{0.54} \right) [1 + 0.023(T_a - 20)^2] \left[\text{Exp} \left(-\frac{k R_n}{2LAI} \right) \right] \frac{\partial \left(\frac{-k R_n}{2LAI} \right)}{\partial k}$$

$$\frac{\partial r_s}{\partial k} = 82 \left(\frac{4.3}{0.54} \right) [1 + 0.023(T_a - 20)^2] \left[\text{Exp} \left(-\frac{k R_n}{2LAI} \right) \right] \left(-\frac{R_n}{2LAI} \right)$$

$$\frac{\partial g_E}{\partial k} = \frac{\partial \left[\frac{2LAI}{(1 + \varepsilon)r_b + r_s} \right]}{\partial k}$$

$$\frac{\partial g_E}{\partial k} = 2LAI \frac{\partial [(1 + \varepsilon)r_b + r_s]^{-1}}{\partial k}$$

$$\frac{\partial g_E}{\partial k} = - \frac{2LAI}{[(1 + \varepsilon)r_b + r_s]^2} \frac{\partial [(1 + \varepsilon)r_b + r_s]}{\partial k}$$

$$\frac{\partial g_E}{\partial k} = - \frac{2LAI}{[(1 + \varepsilon)r_b + r_s]^2} \frac{\partial r_s}{\partial k}$$

$$\frac{\partial g_E}{\partial k} = - \frac{2LAI}{[(1 + \varepsilon)r_b + r_s]^2} \left(82 \left(\frac{4.3}{0.54} \right) [1 + 0.023(T_a - 20)^2] \left[\text{Exp} \left(\frac{-k R_n}{2LAI} \right) \right] \left(-\frac{R_n}{2LAI} \right) \right)$$

$$\frac{\partial E}{\partial k} = g_E \left[\frac{\partial (\chi_{\text{cultivo}} - \chi_a)}{\partial k} \right] + (\chi_{\text{cultivo}} - \chi_a) \left(\frac{\partial g_E}{\partial k} \right)$$

Sensibilidad al coeficiente de transmisividad de la cubierta (τ)

$$R_n = \tau(1 - \exp(-kLAI))I_s$$

$$\frac{\partial R_n}{\partial \tau} = \frac{\partial[\tau(1 - \exp(-kLAI))I_s]}{\partial \tau}$$

$$\frac{\partial R_n}{\partial \tau} = (1 - \exp(-kLAI))I_s$$

$$\frac{\partial r_s}{\partial \tau} = \frac{\partial \left[82 \left(\frac{4.3}{0.54} \right) \left[\text{Exp} \left(\frac{-kR_n}{2LAI} \right) \right] (1 + 0.023(T_a - 20)^2) \right]}{\partial \tau}$$

$$\frac{\partial r_s}{\partial \tau} = 82 \left(\frac{4.3}{0.54} \right) (1 + 0.023(T_a - 20)^2) \frac{\partial \text{Exp} \left(-\frac{kR_n}{2LAI} \right)}{\partial \tau}$$

$$\frac{\partial r_s}{\partial \tau} = 82 \left(\frac{4.3}{0.54} \right) [1 + 0.023(T_a - 20)^2] \left[\text{Exp} \left(-\frac{kR_n}{2LAI} \right) \right] \frac{\partial \left(\frac{-kR_n}{2LAI} \right)}{\partial \tau}$$

$$\frac{\partial r_s}{\partial \tau} = 82 \left(\frac{4.3}{0.54} \right) [1 + 0.023(T_a - 20)^2] \left[\text{Exp} \left(-\frac{kR_n}{2LAI} \right) \right] \left(-\frac{k}{2LAI} \right) \frac{\partial R_n}{\partial \tau}$$

$$\frac{\partial r_s}{\partial \tau} = 82 \left(\frac{4.3}{0.54} \right) [1 + 0.023(T_a - 20)^2] \left[\text{Exp} \left(-\frac{kR_n}{2LAI} \right) \right] \left(-\frac{k}{2LAI} \right) [(1 - \exp(-kLAI))I_s]$$

$$\frac{\partial \chi_{\text{crop}}}{\partial \tau} = \frac{\partial \left(\chi_a^* + \varepsilon \frac{r_b}{2LAI} \frac{R_n}{\lambda} \right)}{\partial \tau}$$

$$\frac{\partial \chi_{\text{crop}}}{\partial \tau} = \varepsilon \frac{r_b}{2LAI\lambda} \frac{\partial R_n}{\partial \tau}$$

$$\frac{\partial \chi_{\text{crop}}}{\partial \tau} = \varepsilon \frac{r_b}{2LAI\lambda} [(1 - \exp(-kLAI))I_s]$$

$$\frac{\partial g_E}{\partial \tau} = \frac{\partial \left[\frac{2LAI}{(1 + \varepsilon)r_b + r_s} \right]}{\partial \tau}$$

$$\frac{\partial g_E}{\partial \tau} = 2LAI \frac{\partial [(1 + \varepsilon)r_b + r_s]^{-1}}{\partial \tau}$$

$$\frac{\partial g_E}{\partial \tau} = -\frac{2LAI}{[(1 + \varepsilon)r_b + r_s]^2} \frac{\partial r_s}{\partial \tau}$$

$$\frac{\partial g_E}{\partial \tau} = -\frac{2LAI}{[(1 + \varepsilon)r_b + r_s]^2} \left\{ 82 \left(\frac{4.3}{0.54} \right) [1 + 0.023(T_a - 20)^2] \left[\text{Exp} \left(-\frac{kR_n}{2LAI} \right) \right] \left(-\frac{k}{2LAI} \right) [(1 - \exp(-kLAI))I_s] \right\}$$

$$\frac{\partial E}{\partial \tau} = g_E \left[\frac{\partial(\chi_{\text{cultivo}} - \chi_a)}{\partial \tau} \right] + (\chi_{\text{cultivo}} - \chi_a) \left(\frac{\partial g_E}{\partial \tau} \right)$$

Sensibilidad para la variable de entrada Área del invernadero (A_s)

$$\frac{\partial \text{fr}_{\text{window}_{\text{lsd}}}}{\partial A_s} = \frac{\partial \left(\frac{n_v}{A_s} \right)}{\partial A_s}$$

$$\frac{\partial \text{fr}_{\text{window}_{\text{lsd}}}}{\partial A_s} = -\frac{n_v}{A_s^2}$$

$$\frac{\partial \text{fr}_{\text{window}_{\text{wsd}}}}{\partial A_s} = \frac{\partial \left(\frac{n_v}{A_s} \right)}{\partial A_s}$$

$$\frac{\partial \text{fr}_{\text{window}_{\text{wsd}}}}{\partial A_s} = -\frac{n_v}{A_s^2}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{wind}}}{\partial A_s} = \frac{\partial \left((f_{\text{lsd}} * \text{fr}_{\text{window}_{\text{lsd}}} + f_{\text{wsd}} * \text{fr}_{\text{window}_{\text{wsd}}}) V_o L_1 L_2 \right)}{\partial A_s}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{wind}}}{\partial A_s} = V_o L_1 L_2 \left[\frac{f_{\text{lsd}} \partial(\text{fr}_{\text{window}_{\text{lsd}}})}{\partial A_s} + \frac{f_{\text{wsd}} \partial(\text{fr}_{\text{window}_{\text{wsd}}})}{\partial A_s} \right]$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{wind}}}{\partial A_s} = -V_o L_1 L_2 \left(\frac{f_{\text{lsd}} n_v}{A_s^2} + \frac{f_{\text{wsd}} n_v}{A_s^2} \right)$$

$$\frac{\partial \varphi_{dT_{\text{lsd}}}}{\partial A_s} = \frac{\partial \left((1/3) a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)| (T_{\text{ext}} - T_a)} (\text{fr}_{\text{window}_{\text{lsd}}}) (L_{\text{win}_{\text{lsd}}})^{1.5} \right)}{\partial A_s}$$

$$\frac{\partial \varphi_{dT_{\text{lsd}}}}{\partial A_s} = (1/3) a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)| (T_{\text{ext}} - T_a)} (L_{\text{win}_{\text{lsd}}})^{1.5} \frac{\partial(\text{fr}_{\text{window}_{\text{lsd}}})}{\partial A_s}$$

$$\frac{\partial \varphi_{dT_{\text{lsd}}}}{\partial A_s} = -(1/3) a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)| (T_{\text{ext}} - T_a)} (L_{\text{win}_{\text{lsd}}})^{1.5} \left(\frac{n_v}{A_s^2} \right)$$

$$\frac{\partial \varphi_{dT_{\text{wsd}}}}{\partial A_s} = \frac{\partial \left((1/3) a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)| (T_{\text{ext}} - T_a)} (\text{fr}_{\text{window}_{\text{wsd}}}) (L_{\text{win}_{\text{wsd}}})^{1.5} \right)}{\partial A_s}$$

$$\frac{\partial \varphi_{dT_{\text{wsd}}}}{\partial A_s} = (1/3) a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)| (T_{\text{ext}} - T_a)} (L_{\text{win}_{\text{wsd}}})^{1.5} \frac{\partial(\text{fr}_{\text{window}_{\text{wsd}}})}{\partial A_s}$$

$$\frac{\partial \varphi_{dT_{wsd}}}{\partial A_s} = -(1/3)a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{ext} - T_a)} (L_{win_{wsd}})^{1.5} \left(\frac{n_v}{A_s^2} \right)$$

$$\frac{\partial \varphi_{wind}^2}{\partial A_s} = 2\varphi_{wind} \frac{\partial \varphi_{wind}}{\partial A_s}$$

$$\frac{\partial \varphi_{wind}^2}{\partial A_s} = 2\varphi_{wind} \left[-V_o L_1 L_2 \left(\frac{f_{lsd} n_v}{A_s^2} + \frac{f_{wsd} n_v}{A_s^2} \right) \right]$$

$$\frac{\partial (\varphi_{dT_{lsd}} + \varphi_{dT_{wsd}})^2}{\partial A_s} = 2(\varphi_{dT_{lsd}} + \varphi_{dT_{wsd}}) \left(\frac{\partial \varphi_{dT_{lsd}}}{\partial A_s} + \frac{\partial \varphi_{dT_{wsd}}}{\partial A_s} \right)$$

$$\frac{\partial \varphi_{win}}{\partial A_s} = \frac{\partial \left(\sqrt{|\varphi_{wind}^2 + (\varphi_{dT_{lsd}} + \varphi_{dT_{wsd}})^2|} \right)}{\partial A_s}$$

$$\frac{\partial \varphi_{win}}{\partial A_s} = \frac{1}{2\sqrt{|\varphi_{wind}^2 + (\varphi_{dT_{lsd}} + \varphi_{dT_{wsd}})^2|}} \frac{\partial [\varphi_{wind}^2 + (\varphi_{dT_{lsd}} + \varphi_{dT_{wsd}})^2]}{\partial A_s}$$

$$\frac{\partial \varphi_{win}}{\partial A_s} = \frac{1}{2\sqrt{|\varphi_{wind}^2 + (\varphi_{dT_{lsd}} + \varphi_{dT_{wsd}})^2|}} \left[\frac{\partial \varphi_{wind}^2}{\partial A_s} + \frac{\partial (\varphi_{dT_{lsd}} + \varphi_{dT_{wsd}})^2}{\partial A_s} \right]$$

$$\frac{\partial \varphi_{win}}{\partial A_s} = \frac{1}{2\sqrt{|\varphi_{wind}^2 + (\varphi_{dT_{lsd}} + \varphi_{dT_{wsd}})^2|}} \left[\frac{\partial \varphi_{wind}^2}{\partial A_s} + \frac{\partial (\varphi_{dT_{lsd}} + \varphi_{dT_{wsd}})^2}{\partial A_s} \right]$$

Sensibilidad para la variable de entrada Número de ventanas (n_v)

$$\frac{\partial fr_{window_{lsd}}}{\partial n_v} = \frac{\partial \left(\frac{n_v}{A_s} \right)}{\partial n_v}$$

$$\frac{\partial fr_{window_{lsd}}}{\partial n_v} = \frac{1}{A_s}$$

$$\frac{\partial fr_{window_{wsd}}}{\partial n_v} = \frac{\partial \left(\frac{n_v}{A_s} \right)}{\partial n_v}$$

$$\frac{\partial fr_{window_{wsd}}}{\partial n_v} = \frac{1}{A_s}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{wind}}}{\partial n_v} = \frac{\partial \left((f_{\text{lsd}} * fr_{\text{window}_{\text{lsd}}} + f_{\text{wsd}} * fr_{\text{window}_{\text{wsd}}}) V_o L_1 L_2 \right)}{\partial n_v}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{wind}}}{\partial n_v} = V_o L_1 L_2 \left[\frac{f_{\text{lsd}} \partial(fr_{\text{window}_{\text{lsd}}})}{\partial n_v} + \frac{f_{\text{wsd}} \partial(fr_{\text{window}_{\text{wsd}}})}{\partial n_v} \right]$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{wind}}}{\partial n_v} = V_o L_1 L_2 \left(\frac{f_{\text{lsd}}}{A_s} + \frac{f_{\text{wsd}}}{A_s} \right)$$

$$\frac{\partial \varphi_{dT_{\text{lsd}}}}{\partial n_v} = \frac{\partial \left((1/3) a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{\text{ext}} - T_a)} (fr_{\text{window}_{\text{lsd}}}) (L_{\text{win}_{\text{lsd}}})^{1.5} \right)}{\partial n_v}$$

$$\frac{\partial \varphi_{dT_{\text{lsd}}}}{\partial n_v} = (1/3) a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{\text{ext}} - T_a)} (L_{\text{win}_{\text{lsd}}})^{1.5} \frac{\partial(fr_{\text{window}_{\text{lsd}}})}{\partial n_v}$$

$$\frac{\partial \varphi_{dT_{\text{lsd}}}}{\partial n_v} = (1/3) a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{\text{ext}} - T_a)} (L_{\text{win}_{\text{lsd}}})^{1.5} \left(\frac{1}{A_s} \right)$$

$$\frac{\partial \varphi_{dT_{\text{wsd}}}}{\partial n_v} = \frac{\partial \left((1/3) a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{\text{ext}} - T_a)} (fr_{\text{window}_{\text{wsd}}}) (L_{\text{win}_{\text{wsd}}})^{1.5} \right)}{\partial n_v}$$

$$\frac{\partial \varphi_{dT_{\text{wsd}}}}{\partial n_v} = (1/3) a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{\text{ext}} - T_a)} (L_{\text{win}_{\text{wsd}}})^{1.5} \frac{\partial(fr_{\text{window}_{\text{wsd}}})}{\partial n_v}$$

$$\frac{\partial \varphi_{dT_{\text{wsd}}}}{\partial n_v} = -(1/3) a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{\text{ext}} - T_a)} (L_{\text{win}_{\text{wsd}}})^{1.5} \left(\frac{1}{A_s} \right)$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{wind}}^2}{\partial n_v} = 2 \varphi_{\text{wind}} \frac{\partial \varphi_{\text{wind}}}{\partial n_v}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{wind}}^2}{\partial n_v} = 2 \varphi_{\text{wind}} \left[V_o L_1 L_2 \left(\frac{f_{\text{lsd}}}{A_s} + \frac{f_{\text{wsd}}}{A_s} \right) \right]$$

$$\frac{\partial (\varphi_{dT_{\text{lsd}}} + \varphi_{dT_{\text{wsd}}})^2}{\partial n_v} = 2 (\varphi_{dT_{\text{lsd}}} + \varphi_{dT_{\text{wsd}}}) \left(\frac{\partial \varphi_{dT_{\text{lsd}}}}{\partial n_v} + \frac{\partial \varphi_{dT_{\text{wsd}}}}{\partial n_v} \right)$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{win}}}{\partial n_v} = \frac{\partial \left(\sqrt{|\varphi_{\text{wind}}^2 + (\varphi_{dT_{\text{lsd}}} + \varphi_{dT_{\text{wsd}}})^2|} \right)}{\partial n_v}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{win}}}{\partial n_v} = \frac{1}{2 \sqrt{|\varphi_{\text{wind}}^2 + (\varphi_{dT_{\text{lsd}}} + \varphi_{dT_{\text{wsd}}})^2|}} \frac{\partial \left[\varphi_{\text{wind}}^2 + (\varphi_{dT_{\text{lsd}}} + \varphi_{dT_{\text{wsd}}})^2 \right]}{\partial n_v}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{win}}}{\partial n_v} = \frac{1}{2\sqrt{|\varphi_{\text{wind}}^2 + (\varphi_{\text{dT}_{\text{lsd}}} + \varphi_{\text{dT}_{\text{wsd}}})^2|}} \left[\frac{\partial \varphi_{\text{wind}}^2}{\partial n_v} + \frac{\partial (\varphi_{\text{dT}_{\text{lsd}}} + \varphi_{\text{dT}_{\text{wsd}}})^2}{\partial n_v} \right]$$

Sensibilidad para la variable de entrada Longitud de ventanas (L₁)

$$\frac{\partial \varphi_{\text{wind}}}{\partial L_1} = \frac{\partial ((f_{\text{lsd}} * \text{fr}_{\text{window}_{\text{lsd}}} + f_{\text{wsd}} * \text{fr}_{\text{window}_{\text{wsd}}}) V_o L_1 L_2)}{\partial L_1}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{wind}}}{\partial L_1} = (f_{\text{lsd}} * \text{fr}_{\text{window}_{\text{lsd}}} + f_{\text{wsd}} * \text{fr}_{\text{window}_{\text{wsd}}}) V_o L_2 \frac{\partial L_1}{\partial L_1}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{wind}}}{\partial L_1} = (f_{\text{lsd}} * \text{fr}_{\text{window}_{\text{lsd}}} + f_{\text{wsd}} * \text{fr}_{\text{window}_{\text{wsd}}}) V_o L_2$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{dT}_{\text{lsd}}}}{\partial L_1} = \frac{\partial \left((1/3) a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)| (T_{\text{ext}} - T_a)} (\text{fr}_{\text{window}_{\text{lsd}}}) (L_{\text{win}_{\text{lsd}}})^{1.5} \right)}{\partial L_1}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{dT}_{\text{lsd}}}}{\partial L_1} = (1/3) a_1 \sqrt{|g(1/283)| (T_{\text{ext}} - T_a)} (\text{fr}_{\text{window}_{\text{lsd}}}) (L_{\text{win}_{\text{lsd}}})^{1.5} \frac{\partial L_1}{\partial L_1}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{dT}_{\text{lsd}}}}{\partial L_1} = (1/3) a_1 \sqrt{|g(1/283)| (T_{\text{ext}} - T_a)} (\text{fr}_{\text{window}_{\text{lsd}}}) (L_{\text{win}_{\text{lsd}}})^{1.5}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{dT}_{\text{wsd}}}}{\partial L_1} = \frac{\partial \left((1/3) a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)| (T_{\text{ext}} - T_a)} (\text{fr}_{\text{window}_{\text{wsd}}}) (L_{\text{win}_{\text{wsd}}})^{1.5} \right)}{\partial L_1}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{dT}_{\text{wsd}}}}{\partial L_1} = (1/3) a_1 \sqrt{|g(1/283)| (T_{\text{ext}} - T_a)} (\text{fr}_{\text{window}_{\text{wsd}}}) (L_{\text{win}_{\text{wsd}}})^{1.5} \frac{\partial L_1}{\partial L_1}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{dT}_{\text{wsd}}}}{\partial L_1} = (1/3) a_1 \sqrt{|g(1/283)| (T_{\text{ext}} - T_a)} (\text{fr}_{\text{window}_{\text{wsd}}}) (L_{\text{win}_{\text{wsd}}})^{1.5}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{wind}}^2}{\partial L_1} = 2\varphi_{\text{wind}} \frac{\partial \varphi_{\text{wind}}}{\partial L_1}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{wind}}^2}{\partial L_1} = 2\varphi_{\text{wind}} [(f_{\text{lsd}} * \text{fr}_{\text{window}_{\text{lsd}}} + f_{\text{wsd}} * \text{fr}_{\text{window}_{\text{wsd}}}) V_o L_2]$$

$$\frac{\partial (\varphi_{\text{dT}_{\text{lsd}}} + \varphi_{\text{dT}_{\text{wsd}}})^2}{\partial L_1} = 2(\varphi_{\text{dT}_{\text{lsd}}} + \varphi_{\text{dT}_{\text{wsd}}}) \left(\frac{\partial \varphi_{\text{dT}_{\text{lsd}}}}{\partial L_1} + \frac{\partial \varphi_{\text{dT}_{\text{wsd}}}}{\partial L_1} \right)$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{win}}}{\partial L_1} = \frac{\partial \left(\sqrt{|\varphi_{\text{wind}}^2 + (\varphi_{\text{dT}_{\text{lsd}}} + \varphi_{\text{dT}_{\text{wsd}}})^2|} \right)}{\partial L_1}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{win}}}{\partial L_1} = \frac{1}{2\sqrt{|\varphi_{\text{wind}}^2 + (\varphi_{\text{dT}_{\text{lsd}}} + \varphi_{\text{dT}_{\text{wsd}}})^2|}} \frac{\partial [\varphi_{\text{wind}}^2 + (\varphi_{\text{dT}_{\text{lsd}}} + \varphi_{\text{dT}_{\text{wsd}}})^2]}{\partial L_1}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{win}}}{\partial L_1} = \frac{1}{2\sqrt{|\varphi_{\text{wind}}^2 + (\varphi_{\text{dT}_{\text{lsd}}} + \varphi_{\text{dT}_{\text{wsd}}})^2|}} \left[\frac{\partial \varphi_{\text{wind}}^2}{\partial L_1} + \frac{\partial (\varphi_{\text{dT}_{\text{lsd}}} + \varphi_{\text{dT}_{\text{wsd}}})^2}{\partial L_1} \right]$$

Sensibilidad para la variable de entrada Ancho de ventanas (L_2)

$$\frac{\partial L_{\text{win}_{\text{lsd}}}}{\partial L_2} = \frac{\partial [L_2 (\sin(\gamma_{\text{rad}}) - \sin(\gamma_{\text{rad}} - (\text{Ap}_{\text{lsd}}/100)\theta_{\text{max}}))] }{\partial L_2}$$

$$\frac{\partial L_{\text{win}_{\text{lsd}}}}{\partial L_2} = (\sin(\gamma_{\text{rad}}) - \sin(\gamma_{\text{rad}} - (\text{Ap}_{\text{lsd}}/100)\theta_{\text{max}})) \frac{\partial L_2}{\partial L_2}$$

$$\frac{\partial L_{\text{win}_{\text{lsd}}}}{\partial L_2} = \sin(\gamma_{\text{rad}}) - \sin(\gamma_{\text{rad}} - (\text{Ap}_{\text{lsd}}/100)\theta_{\text{max}})$$

$$\frac{\partial L_{\text{win}_{\text{lsd}}}}{\partial L_2} = \frac{\partial [L_2 (\sin(\gamma_{\text{rad}}) - \sin(\gamma_{\text{rad}} - (\text{Ap}_{\text{wsd}}/100)\theta_{\text{max}}))] }{\partial L_2}$$

$$\frac{\partial L_{\text{win}_{\text{lsd}}}}{\partial L_2} = (\sin(\gamma_{\text{rad}}) - \sin(\gamma_{\text{rad}} - (\text{Ap}_{\text{wsd}}/100)\theta_{\text{max}})) \frac{\partial L_2}{\partial L_2}$$

$$\frac{\partial L_{\text{win}_{\text{lsd}}}}{\partial L_2} = \sin(\gamma_{\text{rad}}) - \sin(\gamma_{\text{rad}} - (\text{Ap}_{\text{wsd}}/100)\theta_{\text{max}})$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{dT}_{\text{lsd}}}}{\partial L_2} = \frac{\partial \left((1/3)a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{\text{ext}} - T_a)(\text{fr}_{\text{window}_{\text{lsd}}})} (L_{\text{win}_{\text{lsd}}})^{1.5} \right)}{\partial L_2}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{dT}_{\text{lsd}}}}{\partial L_2} = (1/3)a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{\text{ext}} - T_a)(\text{fr}_{\text{window}_{\text{lsd}}})} \frac{\partial (L_{\text{win}_{\text{lsd}}})^{1.5}}{\partial L_1}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{dT}_{\text{lsd}}}}{\partial L_2} = (1/3)a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{\text{ext}} - T_a)(\text{fr}_{\text{window}_{\text{lsd}}})} (1.5)(L_{\text{win}_{\text{lsd}}})^{0.5} \frac{\partial L_{\text{win}_{\text{lsd}}}}{\partial L_1}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{dT}_{\text{lsd}}}}{\partial L_2} = (1/3)a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{\text{ext}} - T_a)(\text{fr}_{\text{window}_{\text{lsd}}})} (1.5)(L_{\text{win}_{\text{lsd}}})^{0.5} [\sin(\gamma_{\text{rad}}) - \sin(\gamma_{\text{rad}} - (\text{Ap}_{\text{lsd}}/100)\theta_{\text{max}})]$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{dT}_{\text{wsd}}}}{\partial L_2} = \frac{\partial \left((1/3)a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{\text{ext}} - T_a)(\text{fr}_{\text{window}_{\text{wsd}}})} (L_{\text{win}_{\text{wsd}}})^{1.5} \right)}{\partial L_2}$$

$$\frac{\partial \varphi_{dT_{\text{wsd}}}}{\partial L_2} = (1/3)a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{\text{ext}} - T_a)} (\text{fr}_{\text{window}_{\text{wsd}}}) \frac{\partial (L_{\text{win}_{\text{wsd}}})^{1.5}}{\partial L_2}$$

$$\frac{\partial \varphi_{dT_{\text{wsd}}}}{\partial L_2} = (1/3)a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{\text{ext}} - T_a)} (\text{fr}_{\text{window}_{\text{wsd}}}) (1.5) (L_{\text{win}_{\text{wsd}}})^{0.5} \frac{\partial L_{\text{win}_{\text{wsd}}}}{\partial L_2}$$

$$\frac{\partial \varphi_{dT_{\text{wsd}}}}{\partial L_2} = (1/3)a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{\text{ext}} - T_a)} (\text{fr}_{\text{window}_{\text{wsd}}}) (1.5) (L_{\text{win}_{\text{wsd}}})^{0.5} [\sin(\gamma_{\text{rad}})$$

$$- \sin(\gamma_{\text{rad}} - (\text{Ap}_{\text{wsd}}/100)\theta_{\text{max}})]$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{wind}}}{\partial L_2} = \frac{\partial (\text{f}_{\text{lsd}} * \text{fr}_{\text{window}_{\text{lsd}}} + \text{f}_{\text{wsd}} * \text{fr}_{\text{window}_{\text{wsd}}}) V_o L_1 L_2}{\partial L_2}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{wind}}}{\partial L_2} = (\text{f}_{\text{lsd}} * \text{fr}_{\text{window}_{\text{lsd}}} + \text{f}_{\text{wsd}} * \text{fr}_{\text{window}_{\text{wsd}}}) V_o L_1 \frac{\partial L_2}{\partial L_2}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{wind}}}{\partial L_2} = (\text{f}_{\text{lsd}} * \text{fr}_{\text{window}_{\text{lsd}}} + \text{f}_{\text{wsd}} * \text{fr}_{\text{window}_{\text{wsd}}}) V_o L_1$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{wind}}^2}{\partial L_2} = 2\varphi_{\text{wind}} \frac{\partial \varphi_{\text{wind}}}{\partial L_2}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{wind}}^2}{\partial L_2} = 2\varphi_{\text{wind}} [(\text{f}_{\text{lsd}} * \text{fr}_{\text{window}_{\text{lsd}}} + \text{f}_{\text{wsd}} * \text{fr}_{\text{window}_{\text{wsd}}}) V_o L_1]$$

$$\frac{\partial (\varphi_{dT_{\text{lsd}}} + \varphi_{dT_{\text{wsd}}})^2}{\partial L_2} = 2(\varphi_{dT_{\text{lsd}}} + \varphi_{dT_{\text{wsd}}}) \left(\frac{\partial \varphi_{dT_{\text{lsd}}}}{\partial L_2} + \frac{\partial \varphi_{dT_{\text{wsd}}}}{\partial L_2} \right)$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{win}}}{\partial L_2} = \frac{\partial \left(\sqrt{|\varphi_{\text{wind}}^2 + (\varphi_{dT_{\text{lsd}}} + \varphi_{dT_{\text{wsd}}})^2|} \right)}{\partial L_2}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{win}}}{\partial L_2} = \frac{1}{2\sqrt{|\varphi_{\text{wind}}^2 + (\varphi_{dT_{\text{lsd}}} + \varphi_{dT_{\text{wsd}}})^2|}} \frac{\partial [\varphi_{\text{wind}}^2 + (\varphi_{dT_{\text{lsd}}} + \varphi_{dT_{\text{wsd}}})^2]}{\partial L_2}$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{win}}}{\partial L_2} = \frac{1}{2\sqrt{|\varphi_{\text{wind}}^2 + (\varphi_{dT_{\text{lsd}}} + \varphi_{dT_{\text{wsd}}})^2|}} \left[\frac{\partial \varphi_{\text{wind}}^2}{\partial L_2} + \frac{\partial (\varphi_{dT_{\text{lsd}}} + \varphi_{dT_{\text{wsd}}})^2}{\partial L_2} \right]$$

Sensibilidad para la variable de entrada Pendiente en el techo (γ)

$$\frac{\partial \sin(\pi/180)(\gamma)}{\partial \gamma} = \frac{\pi}{180} \cos(\pi/180)$$

$$\frac{\partial \sin((\pi\gamma/180) - (Ap_{l\text{sd}}/100)\theta_{\text{max}})}{\partial \gamma} = \frac{\pi}{180} \cos((\pi\gamma/180) - (Ap_{l\text{sd}}/100)\theta_{\text{max}})$$

$$\frac{\partial \sin((\pi\gamma/180) - (Ap_{w\text{sd}}/100)\theta_{\text{max}})}{\partial \gamma} = \frac{\pi}{180} \cos((\pi\gamma/180) - (Ap_{w\text{sd}}/100)\theta_{\text{max}})$$

$$\frac{\partial L_{\text{win}_{l\text{sd}}}}{\partial \gamma} = \frac{\partial [L_2(\sin(\gamma_{rad}) - \sin(\gamma_{rad} - (Ap_{l\text{sd}}/100)\theta_{\text{max}}))]}{\partial \gamma}$$

$$\frac{\partial L_{\text{win}_{l\text{sd}}}}{\partial \gamma} = L_2 \left[\frac{\partial \sin(\gamma_{rad})}{\partial \gamma} - \frac{\partial \sin(\gamma_{rad} - (Ap_{l\text{sd}}/100)\theta_{\text{max}})}{\partial \gamma} \right]$$

$$\frac{\partial L_{\text{win}_{l\text{sd}}}}{\partial \gamma} = L_2 \left[\left(\frac{\pi}{180} \cos(\pi/180) \right) - \left(\frac{\pi}{180} \cos((\pi\gamma/180) - (Ap_{l\text{sd}}/100)\theta_{\text{max}}) \right) \right]$$

$$\frac{\partial L_{\text{win}_{w\text{sd}}}}{\partial \gamma} = \frac{\partial [L_2(\sin(\gamma_{rad}) - \sin(\gamma_{rad} - (Ap_{w\text{sd}}/100)\theta_{\text{max}}))]}{\partial \gamma}$$

$$\frac{\partial L_{\text{win}_{w\text{sd}}}}{\partial \gamma} = L_2 \left[\frac{\partial \sin(\gamma_{rad})}{\partial \gamma} - \frac{\partial \sin(\gamma_{rad} - (Ap_{w\text{sd}}/100)\theta_{\text{max}})}{\partial \gamma} \right]$$

$$\frac{\partial L_{\text{win}_{w\text{sd}}}}{\partial \gamma} = L_2 \left[\left(\frac{\pi}{180} \cos(\pi/180) \right) - \left(\frac{\pi}{180} \cos((\pi\gamma/180) - (Ap_{w\text{sd}}/100)\theta_{\text{max}}) \right) \right]$$

$$\frac{\partial \varphi_{dT_{l\text{sd}}}}{\partial \gamma} = \frac{\partial \left((1/3)a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{\text{out}} - T_{\text{in}})} (fr_{\text{window}_{l\text{sd}}}) (L_{\text{win}_{l\text{sd}}})^{1.5} \right)}{\partial \gamma}$$

$$\frac{\partial \varphi_{dT_{l\text{sd}}}}{\partial \gamma} = (1/3)a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{\text{out}} - T_{\text{in}})} (fr_{\text{window}_{l\text{sd}}}) \frac{\partial (L_{\text{win}_{l\text{sd}}})^{1.5}}{\partial \gamma}$$

$$\frac{\partial \varphi_{dT_{l\text{sd}}}}{\partial \gamma} = (1/3)a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{\text{out}} - T_{\text{in}})} (fr_{\text{window}_{l\text{sd}}}) (1.5)(L_{\text{win}_{l\text{sd}}})^{0.5} \frac{\partial L_{\text{win}_{l\text{sd}}}}{\partial \gamma}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \varphi_{dT_{lsd}}}{\partial \gamma} &= (1/3)a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{out} - T_{in})} (fr_{window_{lsd}})(1.5)(L_{win_{lsd}})^{0.5} \\
&\quad \left\{ L_2 \left[\left(\frac{\pi}{180} \cos(\pi/180) \right) - \left(\frac{\pi}{180} \cos((\pi\gamma/180) - (Ap_{lsd}/100)\theta_{max}) \right) \right] \right\} \\
\frac{\partial \varphi_{dT_{wsd}}}{\partial \gamma} &= \frac{\partial \left((1/3)a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{out} - T_{in})} (fr_{window_{wsd}})(L_{win_{wsd}})^{1.5} \right)}{\partial \gamma} \\
\frac{\partial \varphi_{dT_{wsd}}}{\partial \gamma} &= (1/3)a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{out} - T_{in})} (fr_{window_{wsd}}) \frac{\partial (L_{win_{wsd}})^{1.5}}{\partial \gamma} \\
\frac{\partial \varphi_{dT_{wsd}}}{\partial \gamma} &= (1/3)a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{out} - T_{in})} (fr_{window_{wsd}})(1.5)(L_{win_{wsd}})^{0.5} \frac{\partial L_{win_{wsd}}}{\partial \gamma} \\
\frac{\partial \varphi_{dT_{wsd}}}{\partial \gamma} &= (1/3)a_1 L_1 \sqrt{|g(1/283)|(T_{out} - T_{in})} (fr_{window_{wsd}})(1.5)(L_{win_{wsd}})^{0.5} \\
&\quad \left\{ L_2 \left[\left(\frac{\pi}{180} \cos(\pi/180) \right) - \left(\frac{\pi}{180} \cos((\pi\gamma/180) - (Ap_{wsd}/100)\theta_{max}) \right) \right] \right\} \\
\frac{\partial (\varphi_{dT_{lsd}} + \varphi_{dT_{wsd}})^2}{\partial \gamma} &= 2(\varphi_{dT_{lsd}} + \varphi_{dT_{wsd}}) \left(\frac{\partial \varphi_{dT_{lsd}}}{\partial \gamma} + \frac{\partial \varphi_{dT_{wsd}}}{\partial \gamma} \right) \\
\frac{\partial \varphi_{win}}{\partial \gamma} &= \frac{\partial \left(\sqrt{|\varphi_{wind}^2 + (\varphi_{dT_{lsd}} + \varphi_{dT_{wsd}})^2|} \right)}{\partial \gamma} \\
\frac{\partial \varphi_{win}}{\partial \gamma} &= \frac{1}{2\sqrt{|\varphi_{wind}^2 + (\varphi_{dT_{lsd}} + \varphi_{dT_{wsd}})^2|}} \frac{\partial \left[\varphi_{wind}^2 + (\varphi_{dT_{lsd}} + \varphi_{dT_{wsd}})^2 \right]}{\partial \gamma} \\
\frac{\partial \varphi_{win}}{\partial \gamma} &= \frac{1}{2\sqrt{|\varphi_{wind}^2 + (\varphi_{dT_{lsd}} + \varphi_{dT_{wsd}})^2|}} \left[\frac{\partial (\varphi_{dT_{lsd}} + \varphi_{dT_{wsd}})^2}{\partial \gamma} \right] \\
\frac{\partial \varphi_{win}}{\partial \gamma} &= \frac{1}{2\sqrt{|\varphi_{wind}^2 + (\varphi_{dT_{lsd}} + \varphi_{dT_{wsd}})^2|}} \left[2(\varphi_{dT_{lsd}} + \varphi_{dT_{wsd}}) \left(\frac{\partial \varphi_{dT_{lsd}}}{\partial \gamma} + \frac{\partial \varphi_{dT_{wsd}}}{\partial \gamma} \right) \right]
\end{aligned}$$

Apéndice F. PROGRAMA EN MATLAB PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO 2

```
% IMPLEMENTACIÓN DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO 2
%Programa elaborado por el Dr. Irineo López Cruz y Dra. Raquel
%Salazar Moreno, adaptado por Azucelli Maythe Mauricio Pérez
% Tesis de Maestría de Azucelli Maythe Mauricio Pérez
% Posgrado IAUIA, Universidad Autónoma Chapingo
% Chapingo México, Noviembre de 2012.

global TU X_abs_in TimeSim
global x10 LATHEAT KEXT LWINDOW NWINDOWS As WWINDOW RB
warning('off')

variables12= xlsread('conventsinnb.xls',1,'A2:Z5445');
TiempoSim=variables12(:,1);

Tin=variables12(:,4);% Temperatura interna [° C]
Tout=variables12(:,6);% Temperatura externa [° C]
Tcover=variables12(:,8);% Temperatura de la cubierta [° C]
RHin=variables12(:,12);% Humedad relativa interna [%]
RHout=variables12(:,13);% Humedad relativa externa [%]
Radin=variables12(:,14);% Radiación interna [Wm-2]
LAI=variables12(:,17);% Índice del área foliar del cultivo [-]
WindVel=variables12(:,18);% Velocidad del viento [ms-1]
VPD=variables12(:,24);% Déficit de presión del vapor
WindowLsd=variables12(:,2);% Apertura de la ventana a sotavento
[%]
WindowWsd=variables12(:,2);% Apertura de la ventana a
barlovento [%]

Va=2058.24; % [m3] Volumen total del invernadero
h=6.7; % Volumen del aire en el invernadero/Superficie del
invernadero [m]
As=307.2; % Área del suelo [m2]
Aa=684.48; % Área de la superficie de la cubierta del
invernadero [m2]
RB=200; % Resistencia de la capa límite de la hoja [sm-1]
GAMMA=0.8; % Coeficiente de extinción de la radiación solar
KEXT=0.7; % Coeficiente de transmisividad de la cubierta del
invernadero
LATHEAT=2540; % Calor latente de vaporización del agua [Jg-1]
RHOAIR=1.225; % Densidad del aire [kgm3]
```

```

CPAIR=1000; % Capacidad de calor especifico del aire (J/(Kg
Kg))
NWINDOWS=20; % Número total de ventanas.
Windowlsd=12; % Número de ventanas a sotavento [-]
Windowwsd=8; % Número de ventanas a barlovento [-]
SLOPE=24.9; % Pendiente-ángulo de la cresta [°]
AREAFLOOR=307.2; % Área del piso del invernadero [m²]
LWINDOW=3.2; % Largo de la ventana del invernadero [m]
WWINDOW=0.8; % Ancho de la ventana del invernadero [m]
Patm=101324.9; % Presión atmosférica, Berlín [Pa]
Kcba=0.1192699; % Coeficiente de transferencia de masa [Wm²K⁻¹]
MWratio=0.622; %Radio de humedad: Relación entre peso molar de
vapor de agua y aire seco.

X_abs_in=zeros(numel(RHin),1);
for i=1:numel(RHin)
    X_abs_in(i)=RH_to_X_abs(Tin(i),RHin(i));
end

x10=X_abs_in(1);
S10=0;

TimeSim=[0:300:5443*300]';

TU=[TimeSim Tin Tout Tcover RHout Radin LAI WindVel WindowLsd
WindowWsd];
Opciones=simset('solver','ode45','reltol',1e-10,'abstol',1e-12);
[t,x,y]=sim('hubabshv1',TimeSim,Opciones,TU);

figure(1);
plot(TimeSim/(3600*24),X_abs_in,'',t/(3600*24),x(:,1),'-');
xlabel('Tiempo [d]')
ylabel('Humedad absoluta[mg/m3]');
legend('Medida','Estimada');

figure(2);
plot(TimeSim/(3600*24),RHin,'',t/(3600*24),y(:,2),'-');
xlabel('Tiempo [d]')
ylabel('Humedad Relativa [%]');
legend('Medido','Estimado');

disp('Statistics before calibration:');
MSE=((x(:,1)-X_abs_in)'*(x(:,1)-X_abs_in))/numel(X_abs_in)
RMSE=sqrt(MSE)
MAE=sum(abs((x(:,1)-X_abs_in)))/numel(X_abs_in)

ymed=mean(X_abs_in);
ymedest=mean(x(:,1));
EF=1-((x(:,1)-X_abs_in)'*(x(:,1)-X_abs_in))/((X_abs_in-ymed)'*(X_abs_in-ymed))

```

```

% Relative statistics
varmed=sqrt((1/numel(X_abs_in)-1)*((X_abs_in-ymed)'*(X_abs_in-ymed)));
varest=sqrt((1/numel(x(:,1))-1)*((x(:,1)-ymedest)'*(x(:,1)-ymedest)));
covmedest=(1/numel(X_abs_in)-1)*((x(:,1)-ymed)'*(X_abs_in-ymedest));
coefcorr=covmedest/(varmed*varest)

RMAE=MAE/((1/numel(X_abs_in))*sum(abs(X_abs_in)))

fname='Evalhumidity2';
options=optimset('MaxIter',20000,'Display','Iter','MaxFunEvals',80000);

LATHEAT=2540; % Calor latente de vaporización del agua [Jg-1]
KEXT=0.7; % Coeficiente de transmisividad de la cubierta del invernadero
LWINDOW=3.2; % Largo de la ventana del invernadero [m]
NWINDOWS=20; % Número total de ventanas.
As=307.2; % Área del suelo [m2]
WWINDOW=0.8; % Ancho de la ventana del invernadero [m]
RB=200; % Resistencia de la capa límite de la hoja [sm-1]

Params=[LATHEAT,KEXT,LWINDOW,NWINDOWS,As,WWINDOW,RB];
xmin=[1016,0.665,1.28,16,291.84,0.64,90]; % Lower limit of the control variable. (Used only for initialization)
xmax=[2540,0.7,3.2,17,307.2,0.68,95]; % Upper limit of the control variable. (Used only for initialization)

[X,RESNORM,RESIDUAL,EXITFLAG,OUTPUT,LAMBDA,JACOBIAN]=lsqnonlin(fname,Params,xmin,xmax,options);

LATHEAT=X(1);
KEXT=X(2);
LWINDOW=X(3);
NWINDOWS=X(4);
As=X(5);
WWINDOW=X(6);
RB=X(7);

Opciones=simset('solver','ode45','reltol',1e-10,'abstol',1e-12);
[t,x,y]=sim('hubabshv1',TimeSim,Opciones,TU);

figure (1);
plot(TimeSim/(3600*24),X_abs_in,'t/(3600*24),x(:,1),'-');
xlabel('Tiempo [d]');
ylabel('Humedad absoluta[mg/m3]');
legend('Medida','Estimada');

```

```

figure(2);
plot(TimeSim/(3600*24),RHin,'',t/(3600*24),y(:,2),'-');
xlabel('Tiempo [d]')
ylabel('Humedad Relativa [%]');
legend('Medido','Estimado');

disp('Statistics after calibration: ');
MSE=((x(:,1)-X_abs_in)'*(x(:,1)-X_abs_in))/numel(X_abs_in)
RMSE=sqrt(MSE)
MAE=sum(abs((x(:,1)-X_abs_in)))/numel(X_abs_in)

ymed=mean(X_abs_in);
ymedest=mean(x(:,1));
EF=1-((x(:,1)-X_abs_in)'*(x(:,1)-X_abs_in))/((X_abs_in-ymed)'*(X_abs_in-ymed))

% Relative statistics
varmed=sqrt((1/numel(X_abs_in)-1)*((X_abs_in-ymed)'*(X_abs_in-ymed)));
varest=sqrt((1/numel(x(:,1))-1)*((x(:,1)-ymedest)'*(x(:,1)-ymedest)));
covmedest=(1/numel(X_abs_in)-1)*((x(:,1)-ymed)'*(X_abs_in-ymedest));
coefcorr=covmedest/(varmed*varest)

RMAE=MAE/((1/numel(X_abs_in))*sum(abs(X_abs_in)))

```

Apéndice G. PROGRAMA EN MATLAB DE LA VENTILACIÓN ESPECÍFICA REQUERIDO EN EL PROGRAMA PRINCIPAL DEL MODELO 2

```
% PROGRAMA PARA LA IMPLEMENTACION DE LA FUNCION DE VENTILACION
(Jong, 1990)
% Programa elaborado por el Dr. Irineo López Cruz y Dra. Raquel
% Salazar Moreno, adaptado por Azucelli Maythe Mauricio Pérez
% Tesis de Maestría de Azucelli Maythe Mauricio Pérez
% Posgrado IAUIA, Universidad Autónoma Chapingo
% Chapingo México, Noviembre de 2012.

function Gv=specificvent(u)

Tin=u(1);%Temperatura interna [° C]
Nwindows=u(2);%Número total de ventanas [-]
AreaFloor=u(3);%Área del piso del invernadero [m²]
Lwindow=u(4);% Largo de la ventana del invernadero [m]
Wwindow=u(5);% Ancho de la ventana del invernadero [m]
Slope=u(6);% Pendiente, Slope= 49.9 [°]
Windowlsd=u(7);% Apertura de la ventana a sotavento [%]
Windowwsd=u(8);% Apertura de la ventana a barlovento [%]
vWind=u(9);% Velocidad del viento [ms-1]
Tout=u(10);% Temperatura externa [° C]

fa =1; % Factor de infiltración [-]
c01 =0.00012673; % coef. 0 del polinomio 1 (ventilación)
c02 =0.000591362; % coef. 0 del polinomio 2 ( " )
c11 =0.000471176; % coef. 1 del polinomio 1 ( " )
c12 =0.000708828; % coef. 1 del polinomio 2 ( " )
c21 =0.00000377646; % coef. 2 del polinomio 1 ( " )
c22 =0.00000448621; % coef. 2 del polinomio 2 ( " )
c31 =0.0000000121774;% coef.3 del polinomio 1 ( " )
c32 =0.0000000242856;% coef.3 del polinomio 2 ( " )

%Número de ventanas a sotavento por metro cuadrado de suelo [m-2]
(0.05 anterior para ambos)
fr_window_lsd=(Nwindows/AreaFloor);

%Número de ventanas a barlovento por metro cuadrado de suelo[m-2]
fr_window_wsd=(Nwindows/AreaFloor);

L1 = Lwindow; % Largo de la ventana, L1=3.2 [m]
L2 = Wwindow; % Ancho de la ventana, L2=0.8 [m]
% Ángulo máximo de apertura de la ventana [rad] %
```

```

        THETA_max =49.9*2.0*pi/360.0;
a1  = 0.6;           % coeficiente de transporte [-]
g    = 9.81;         % Gravedad [ms-2]

% Ángulo de la cubierta del invernadero con la horizontal [rad]
        GAMMA=(pi/180.0)*Slope;
Ap_lsd = Windowlsd; %10=Window_lsd;
Ap_wsd = Windowwsd; %10=Window_wsd;
Vo = vWind; %Velocidad inicial del viento [ms-1]

% Ventilación natural entre el aire interno y exterior [W]
% Función de la ventilación para el sotavento [-]

f_lsd=c31*power(Ap_lsd,3.0)-c21*power(Ap_lsd,2.0) + c11*Ap_lsd +
c01;

% Función de ventilación para el barlovento [-]
f_wsd=c32*power(Ap_wsd,3.0)-c22*power(Ap_wsd,2.0) + c12*Ap_wsd +
c02;
% Velocidad del viento dentro del invernadero [m3m-2s-1]

PHI_wind=(f_lsd*fr_window_lsd+f_wsd*fr_window_wsd)*Vo*L1*L2;

% Longitud de la proyección vertical de la abertura de la
ventana en el lado de sotavento [m]
L_win_lsd=L2*(sin(GAMMA)-sin(GAMMA-(Ap_lsd/100.0)*THETA_max));

% Ventilación en el lado de sotavento debido al diferencial de
temperatura entre interior y exterior [m3m-2s-1]

PHI_dT_lsd=(1.0/3.0)*a1*L1*sqrt(abs(g*(1.0/283.0)*(Tout-
Tin)))*fr_window_lsd*power(L_win_lsd,1.5); %dato(4)=Tout
% Longitud de la proyección vertical de la abertura de la
ventana en el lado de barlovento [m]

L_win_wsd=L2*(sin(GAMMA)-sin(GAMMA-(Ap_wsd/100.0)*THETA_max));

% Ventilación a barlovento debido al diferencial de temperatura
entre interior y exterior [m3s-1]

PHI_dT_wsd=(1.0/3.0)*a1*L1*sqrt(abs(g*(1.0/283.0)*(Tout-
Tin)))*fr_window_wsd*power(L_win_wsd,1.5);

% Fuga de la ventilación [m3s-1]
        PHI_lek=0.000083+0.000035*Vo*fa;
% Ventilación a través de la ventana [m3s-1]

PHI_win=sqrt(abs(power(PHI_wind,2.0)+power((PHI_dT_lsd+PHI_dT_ws
d),2.0)));
% Flujo de ventilación interior-externo [m3s-1]
        Gv=(PHI_lek+PHI_win);

```