

Calibración y validación de un modelo de transpiración para gestión de riegos de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) en invernadero

Antonio Martínez-Ruiz¹, Irineo L. López-Cruz¹, Agustín Ruiz-García¹ y Armando Ramírez-Arias¹

¹Postgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco, km. 38.5. Chapingo, Texcoco Estado de México. C. P. (56230ilopez@correo.chapingo.mx; aruizg64@hotmail.com; ariasar_mx@yahoo.com.mx). Autor para correspondencia: mara2883@hotmail.com.

Resumen

El cultivo de jitomate es una de las cinco hortalizas más cultivadas en México por lo que es importante estudiar su tasa de transpiración considerando las variables climáticas más influyentes en el proceso. Esto puede llevarse a cabo mediante modelos matemáticos, los cuales una vez calibrados y evaluados pueden llegar a ser de gran utilidad en el control automático de la aplicación del agua de riego. En el presente trabajo se calibró el modelo de transpiración propuesto por Baille, a partir de la simplificación del modelo de Penman-Monteith, para su aplicación en la gestión de riegos. Se estudió la transpiración de un cultivo de jitomate (*Solanum lycopersicon* L.) cultivada en hidroponía. El experimento se estableció en un invernadero tipo sierra con ventilación cenital, localizado en el campo experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, (19° 29' latitud norte, 98° 53' longitud oeste, 2 240 msnm). Las variables meteorológicas temperatura, humedad relativa y radiación global fueron medidas dentro del invernadero promediadas y almacenadas cada 15 minutos en un datalogger marca Campbell Scientific. La transpiración se cuantificó de manera indirecta con la ayuda de una balanza electrónica marca Sartorius modelo QA y las mediciones se almacenaron en una PC cada minuto. El índice de área foliar se determinó mediante un método no destructivo en dos períodos. Usando datos de 4 días se estimaron los coeficientes del término radiativo ($A = 0.372$) y del término aerodinámico del modelo ($B = 30.44$). Se evaluó el comportamiento del modelo con los coeficientes estimados usando 8 días de datos restantes, obteniéndose un ajuste de los datos con $r^2 = 0.96$ y

SCME = 7.84. El modelo calibrado puede utilizarse de manera confiable para la gestión de riegos para el cultivo de jitomate en invernaderos.

Palabras claves: automatización, estimación de parámetros, hidroponía.

Introducción

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

En el desarrollo de cultivos, el microclima y sus variaciones influyen en los procesos de intercambio de gases y relaciones hídricas. Esta variaciones no se pueden controlar en campo, pero si es factible hacerlo en cultivos dentro de invernaderos. Uno de los problemas que frecuentemente se presenta en la producción en invernaderos, es el desconocimiento preciso del consumo de agua por el cultivo y esto conlleva a no tener un buen manejo del riego.

Debido a la problemática de la escasez del recurso hídrico, que tiene preocupado a casi todos los agricultores del mundo, es necesario buscar métodos que nos permita ser eficientes en el uso del agua, además de que poco se ha trabajado en medir la cantidad de agua usada por los cultivos en la agricultura protegida. Medir la tasa de transpiración de un cultivo es de suma importancia ya que de este conocimiento se puede tener un mejor manejo de la aplicación del riego dentro de los invernaderos. El uso de la tecnología, en la producción agrícola, ha tomado auge, debido principalmente a la gran necesidad de agua y a su baja disponibilidad de ella. El mayor uso del recurso agua es en el sector agrícola y en tiempos recientes, se tienen problemas de rentabilidad, requiriéndose una atención prioritaria en la programación de riego.

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

Desde el punto de vista práctico el modelo matemático propuesto por Baille *et al.* (1994) predice la tasa de transpiración del cultivo a corto plazo, utilizando como variables de entrada la radiación incidente sobre el dosel R_g ($W\ m^{-2}$) y el déficit de presión de vapor D (kPa), los cuales en invernaderos equipados para el control climático, se registran continuamente y el valor de índice de área foliar puede estimarse a partir de correlaciones en las que intervienen las dimensiones de la planta, como su altura o bien en función de los días después de la siembra.

Una vez calibrado este modelo puede ser de gran ayuda en la programación de los riegos. Por lo anterior, en el presente trabajo se planteó estudiar el comportamiento del modelo de Baille en la transpiración de un cultivo de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en invernadero, llevar a cabo su calibración y evaluarlo bajo condiciones de clima templado en el centro de México con la finalidad de usar la estimación de la transpiración del cultivo en la gestión de riego.

Materiales y métodos

Descripción del invernadero y cultivo

El experimento se estableció en un invernadero tipo sierra con ventilación cenital, localizada en el campo experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, con ubicación geográfica $19^{\circ} 29'$ latitud norte y $98^{\circ} 53'$ longitud oeste, y 2 240 msnm. El invernadero tiene una orientación N-S y está cubierto de una capa de plástico calibre 700 tratado contra los rayos ultravioleta, está constituido por 3 naves cuyas dimensiones son de $8.5 * 76$ m con un área total de 1938 m². Cuenta con 3 ventanas cenitales, 2 ventanas laterales y 2 frontales. Las ventanas laterales miden $2 * 76$ m, las ventanas frontales $2 * 25.5$ m y las ventanas cenitales $1.6 * 76$ m, todas las ventanas están cubiertas con mallas antiáfidos de $25 * 40$ hilos in² para evitar la entrada de insectos. La apertura y cierre de ventanas se realiza en forma semi-automática. El invernadero cuenta con un sistema de riego por goteo con goteros auto compensados con adaptadores de cuatro salidas, cada salida con su respectivo tubín y estaca que son colocados en cada maceta. Además, cuenta con un temporizador para aplicación de riegos e inyección de fertilizantes.

La variedad de jitomate cultivada fue 'Rafaello' de crecimiento indeterminado, la siembra se realizó el 07 de abril de 2011 y el trasplante el 07 de mayo. El manejo del cultivo se desarrolló de acuerdo a las recomendaciones para un cultivo comercial para la zona de estudio. Las plantas fueron cultivadas en un sistema hidropónico, en bolsas de polietileno de 30-40 cm usando como sustrato una combinación de tezontle y fibra de coco con una relación (30% / 70% respectivamente).

Medición de variables meteorológicas

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

La radiación solar se midió con piranómetro modelo CMP3-L de Kipp & Zone, el cual mide la radiación solar con alta precisión esta equipado con una termopila negrecida protegida por una cúpula. La termopila negrecida provee una respuesta espectral plana a espectro completo de radiación. Esto permite el uso de CMP3-L bajo el follaje del cultivo, con lámparas, cuando está nublado y para la medición de la radiación reflejada. Todas las variables meteorológicas se monitorearon durante 12 días consecutivos que comprendieron entre 08 al 19 de julio de 2011.

Medición de la tasa de transpiración

El método para determinar la transpiración E ($\text{kg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$) consistió en usar una balanza electrónica de acuerdo a la metodología propuesta en la literatura (Sánchez *et al.*, 2008; Medrano, 1999). La balanza se instaló al centro del invernadero sobre una de las líneas del cultivo. El dispositivo consta de una balanza electrónica marca Sartorius modelo QA. Con capacidad de 150 kg y una precisión de ± 2 g. Las plantas a muestrear se colocaron sobre una estructura diseñada para tal efecto de tal forma que estas se mantuvieran aisladas del tutoraje de las demás y así disminuir los posibles errores que se pudieran presentar.

Las bolsas del sustrato se cubrieron con un plástico blanco para evitar la evaporación y de esta manera cuantificar únicamente el agua perdida correspondiente a la transpiración. La estructura está compuesta por dos bandejas de acero galvanizado, una de ellas es sobre las que se colocaron las macetas y es por donde fluyen los lixiviados y estos al mismo tiempo caen a una segunda bandeja (situada debajo de la primera) y es donde se almacenan los lixiviados por cerca de 3 días, hasta que sean desfogados desde una llave de paso situada en la parte inferior de esta bandeja. El almacenamiento de los datos de transpiración se tomó durante 12 días (08-julio-2011 al 19-julio-2011).

Medición del área foliar

Esta variable se midió cada 15 días aproximadamente, haciéndose dos mediciones antes y después del bloque de datos usados en este experimento. El área foliar se estimó mediante un método no destructivo, para no destruir las plantas colocadas en la balanza. Para ello fue necesario el uso de un integrador de área foliar LI-COR modelo LI-3100, midiéndose las dimensiones del largo y el ancho, y el área foliar de cuatro plantas tomadas al azar en el invernadero, y con estas medidas se buscó mediante una ecuación de

regresión lineal el mejor modelo que correlacionara las dimensiones de las hojas con el área foliar, y el mejor modelo obtenido se utilizó para determinar el área foliar de las plantas de la unidad experimental, midiéndose de estas plantas el largo y el ancho de cada hoja, el mejor modelo al cual se le ajustaron los datos fue del tipo potencial con un R^2 de 0.8406 y un RMSE de 69.67 y fue para la dimensión de ancho de hoja.

El área foliar de las plantas de jitomate se determinó en dos ocasiones, la primera medida se llevó a cabo antes de la toma de datos climáticos y transpiración (07 de Julio de 2011), y la segunda medición se hizo después, y con estos dos conjuntos datos se realizó una interpolación usando el ambiente de programación Matlab para obtener el área foliar cada 15 min de todo el bloque de datos obtenidos.

Cálculo de las tasas de transpiración

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

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

Donde: Δt = intervalo de tiempo (s); $P_s(t+dt)$ y $P_s(t)$ representan las masas (kg) registradas entre dos intervalos sucesivos de tiempo y S es la superficie equivalente de invernadero(m^2) correspondiente a las plantas situadas sobre la balanza, que será la relación entre el número de plantas (n)= 8 plantas, situadas sobre la balanza y su densidad de siembra D_s = 2.6.

Modelación de la tasa de transpiración

Existen dos enfoques generales para estimar la evapotranspiración indirectamente a partir ya sea de modelos empíricos o modelos teóricos usando datos meteorológicos. El enfoque empírico usa análisis de

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

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

$$\lambda E = Af_1(IAF)R_g + Bf_2(IAF)D_a \quad 2)$$

Para $f_1 = 1 - \exp(-kIAF)$ y $f_2 = IAF$ por lo que finalmente se tiene

$$\lambda E = A(1 - \exp(-kIAF))R_g + B(IAF)D_a \quad 3)$$

Donde: λE = tasa de evapotranspiración del cultivo expresados en unidades de energía [$W\ m^{-2}$] aunque también se puede expresar con unidades de $g\ m^{-2}\ min^{-1}$; R_g =radiación solar incidente [$W\ m^{-2}$]; D_a = déficit de presión de vapor [kPa]; IAF =índice de área foliar [$m^2\ m^{-2}$]; f_1 y f_2 = funciones adimensionales de IAF ; A y B =parámetros del modelo (A, adimensional; B, [$W\ m^{-2}\ kPa^{-1}$]). El parámetro A se refiere al término radiativo y B al término aerodinámico (o término advectivo). Por lo tanto A y B también se les conocen coeficiente de radiación y coeficiente aerodinámico, respectivamente.

Medrano (1999) menciona que para calcular los flujos de masa que entran y salen del invernadero, la humedad se expresa en unidades de masa ($kg\ m^{-3}$ o $kg\ aire^{-1}$); sin embargo, cuando se considera la respuesta de las plantas a la humedad la medidas se suelen expresar en déficit de presión de vapor (D_a). La humedad relativa es muy utilizada en la práctica, pero este valor es de limitada importancia ya que no está directamente relacionado con

la demanda evaporativa del aire. A un valor constante de humedad relativa un aumento de la temperatura implica un aumento del D_a . El déficit de presión de vapor es un indicador más sensible de las condiciones de vapor del aire y varía en un rango bastante amplio con los cambios de temperatura. La pérdida de agua de las hojas está gobernada por el gradiente de presión entre la hoja y el aire que la rodea y este depende mayoritariamente del déficit de presión de vapor.

Procedimiento de calibración

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

$$\min f(p) = \sum_{i=1}^N (y_{i,est} - y_{i,obs})^2 \quad 4)$$

Donde: p = vector que contiene los parámetros a estimar y N = es el número de mediciones de la transpiración. El problema de optimización se resolvió numéricamente usando el procedimiento de mínimos cuadrados no lineales, el cual se encuentra implementado en la rutina lsqnonlin.m del Optimization toolbox de Matlab. El procedimiento de mínimos cuadrados utiliza el algoritmo de Levenberg-Marquardt para minimizar la función (4). Sólo requiere que el usuario defina un vector diferencia entre las estimaciones y las mediciones de la variable de interés.

Resultados

En la Figura 1 se muestran las variables climáticas que requiere el modelo de transpiración de Baille, medidas dentro del invernadero. En la Figura 2 se muestra la transpiración medida con la balanza lisímetro. Ambas mediciones para todo el periodo de duración del experimento.

Inicialmente se ejecutaron simulaciones del modelo usando valores para los parámetros radiativo y aerodinámico reportados en la literatura. Medrano *et al.* (2008) encontraron buenos resultados para un cultivo de jitomate en Almería España, usando los valores de coeficientes de A y B, 0.59 y 19.1 respectivamente. En la Figura 3 y 4 se

presentan las gráficas de transpiración simulada usando estos valores y 4 días de mediciones. Puede observarse que el ajuste de las predicciones con las mediciones de

la transpiración no es bueno por lo que se procedió a la calibración del modelo usando los datos de estos mismos 4 días de mediciones.

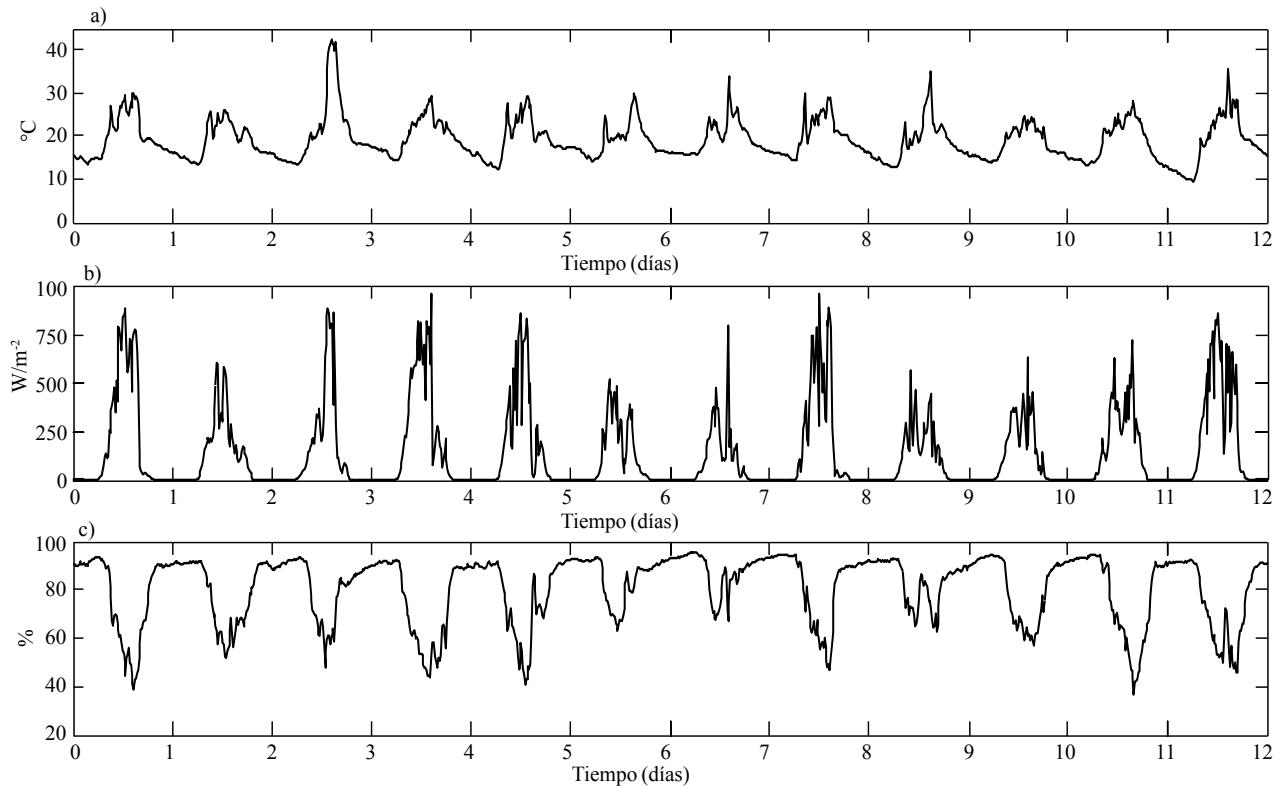


Figura 1. Variables meteorológicas medidas dentro del invernadero del 08 al 19 de julio de 2011, Chapingo, Estado de México.
a) temperatura; b) radiación solar global; y c) humedad relativa.

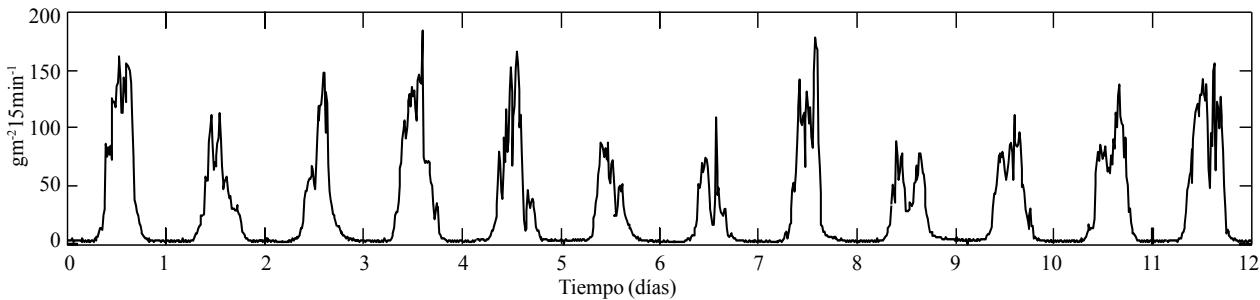


Figura 2. Transpiración de un cultivo de jitomate en invernadero medida del 08 al 19 de julio de 2011 en Chapingo, Estado de México.

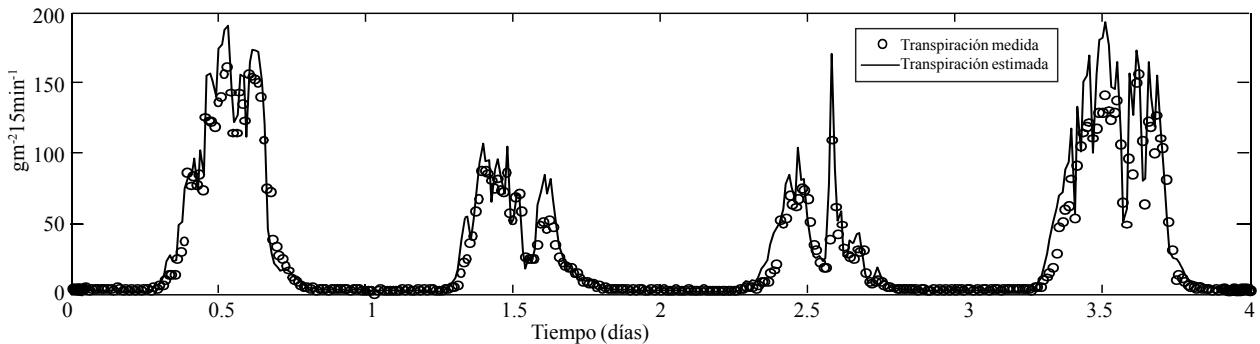


Figura 3. Valores de transpiración estimados con el modelo de Baille con los parámetros de Medrano (2008), para los días 08, 13, 14, 19 de julio de 2011 para IAF 2.3- 3.02 m m⁻².

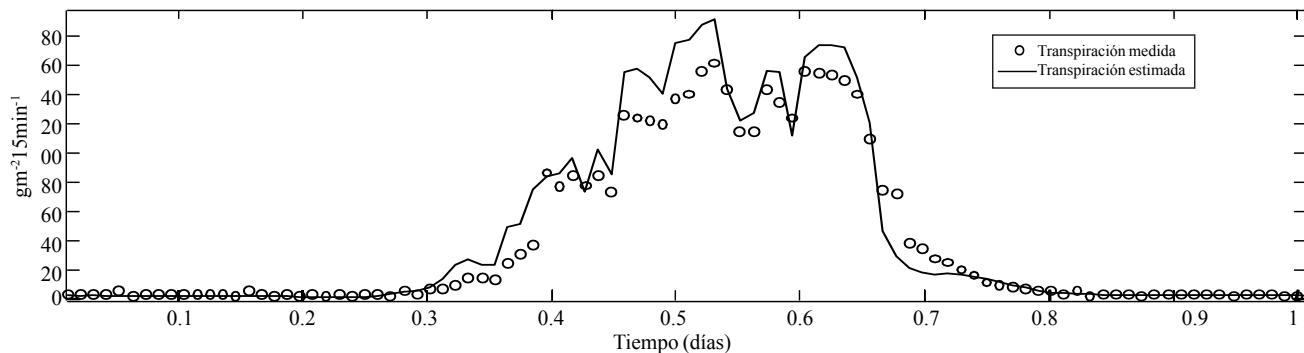


Figura 4. Valores de transpiración estimados con el modelo de Baille para el día 08-julio-2011 con los parámetros de Medrano (2008).

Calibración del modelo

Las Figuras 5 y 6 muestran la simulación de la transpiración mediante el modelo de Baille para 4 días de mediciones y para un día (08 de julio) usando los nuevos valores de los parámetros radiativo y aerodinámico (0.3723 y 30.44) obtenidos mediante el proceso de calibración. Puede observarse que mejoró la calidad de predicción del modelo.

La Figura 7 muestra el comportamiento de la transpiración estimada por el modelo de Baille separando sus componentes radiativo y advectivo, y la comparación contra mediciones de la radiación global y el déficit de presión de vapor. Puede apreciarse que las tasas de transpiración siguen ambas variables climáticas.

En la Figura 8 se muestra el buen ajuste obtenido mediante la calibración, entre la transpiración medida y la transpiración estimada por el modelo expresado mediante una gráfica 1:1 y una ecuación de regresión lineal simple.

Validación del modelo

Para evaluar de mejor forma la calidad de predicción del modelo, se usaron los datos obtenidos durante 8 días y se ejecutó una simulación usando los resultados obtenidos en la calibración. Las Figuras 9 y 10 muestran la comparación entre las predicciones del modelo y las mediciones. Puede observarse que el ajuste es aceptable con un r^2 de 0.951.

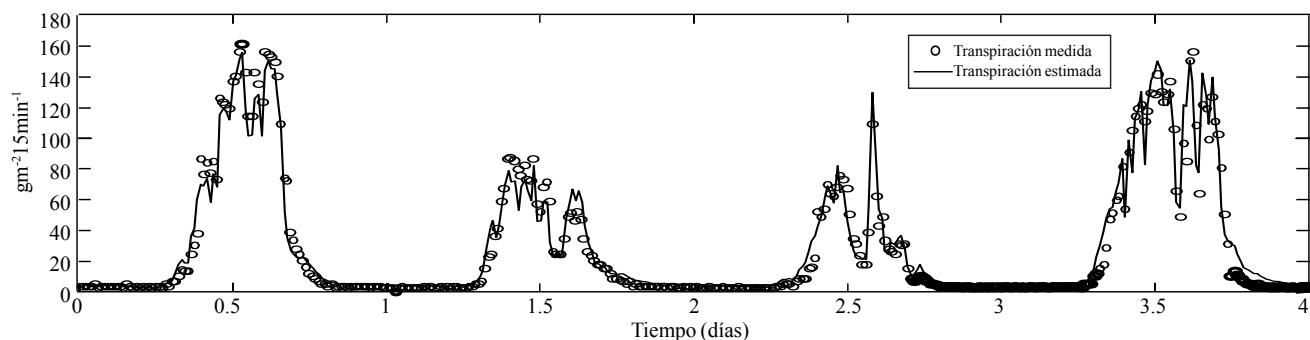


Figura 5. Calibración del modelo de Baille para los días 08, 13, 14, 19 de Julio de 2011 para IAF 2.3-3.02 m m⁻².

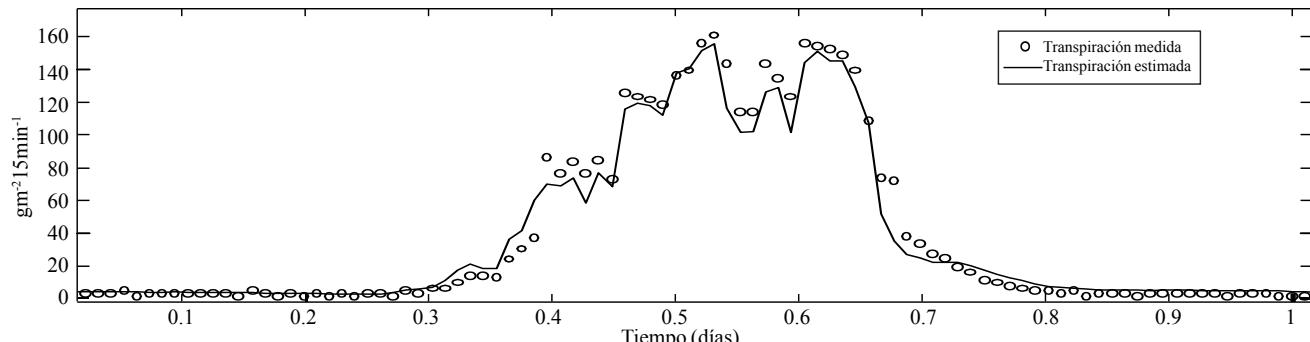


Figura 6. Calibración del modelo de Baille para el día 08-julio-2011 para IAF 2.3 m m⁻².

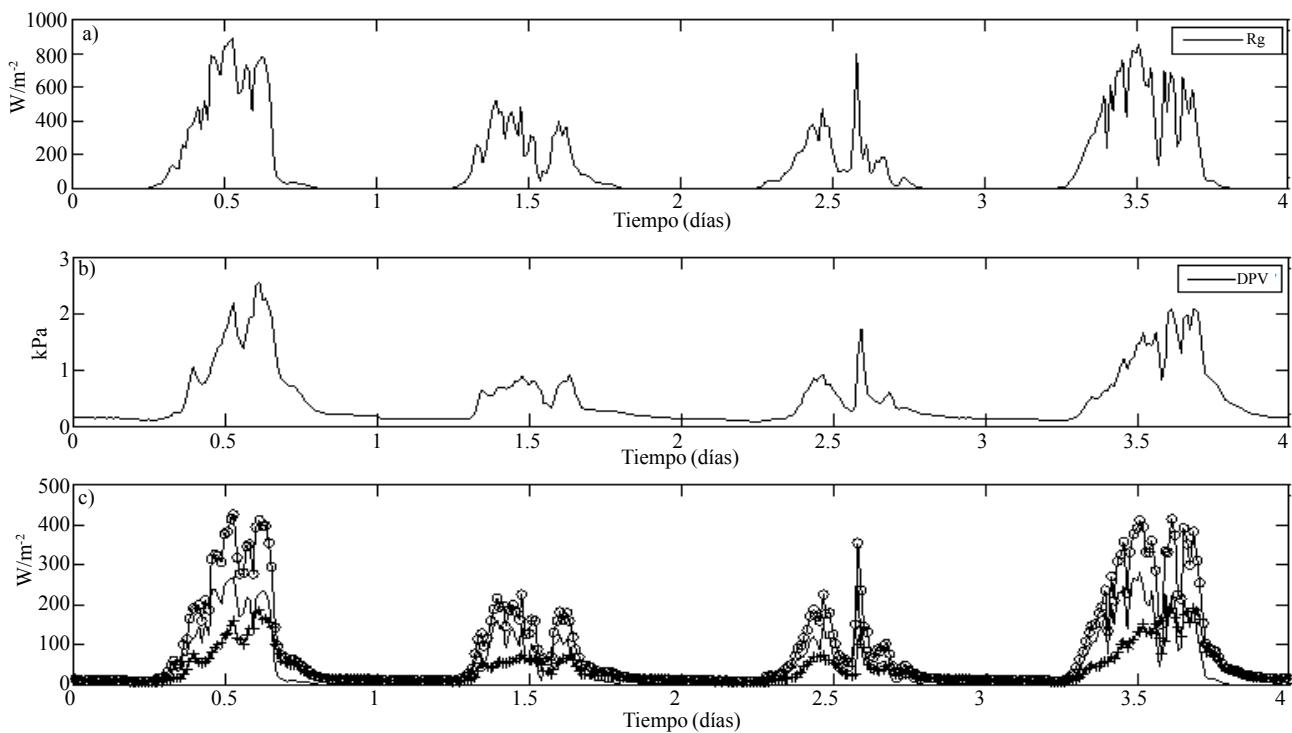


Figura 7. Valores de la radiación global a), valores del DPV b), transpiración debido al término radiativo (-), término aerodinámico (-+) y la suma de ambos términos (-o).

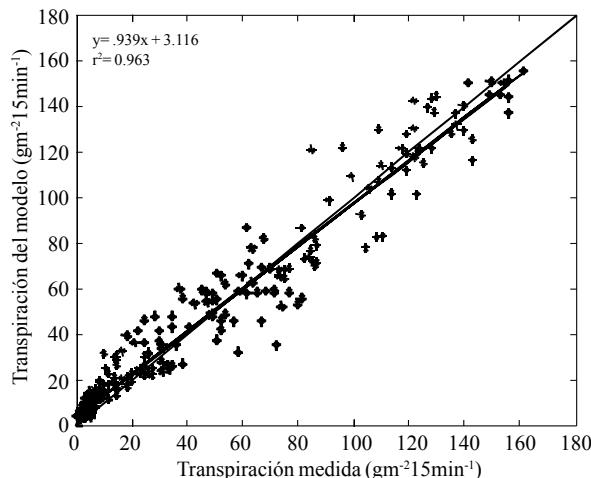


Figura 8. Gráfica de regresión entre la transpiración medida y estimada por el modelo y gráfica 1:1 de todos los días.

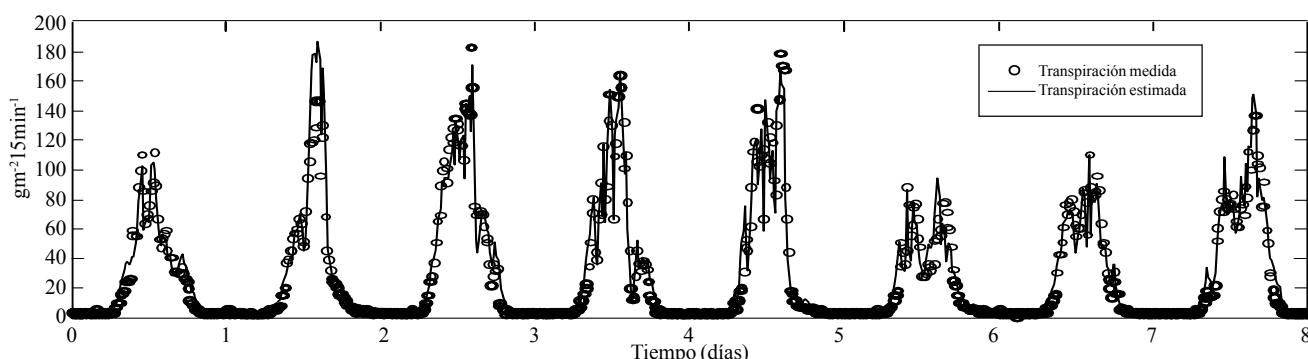


Figura 9. Validación de la transpiración de los días 09, 10, 11, 12, 15, 16, 17, 18 de julio de 2011 para IAF 2.3- 3.02 m m^{-2} .

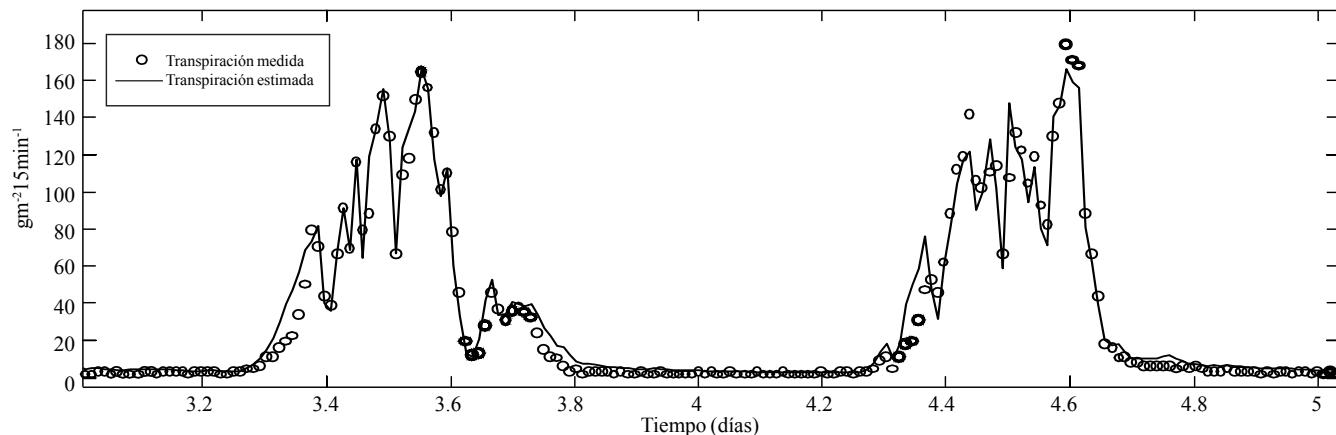


Figura 10. Validación del modelo de transpiración de los días 12 y 15 de julio de 2011 para IAF 2.3-3.02 m m⁻².

En la Figura 11. Se grafican la transpiración estimada con sus componentes radiativo y advectivo.

En la Figura 12 se muestra el ajuste obtenido mediante una validación, entre la transpiración medida y la transpiración estimada por el modelo, mediante una gráfica 1:1 y una ecuación de regresión lineal simple.

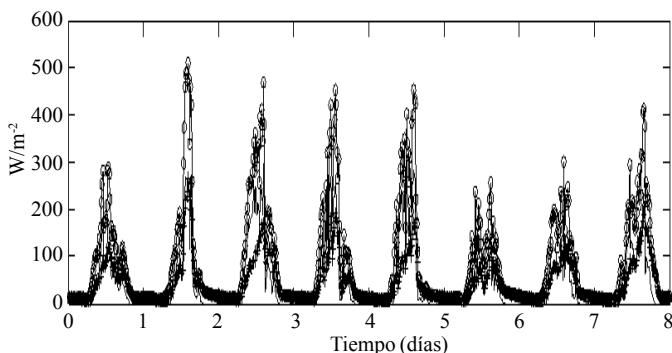


Figura 11. Transpiración debido al término radiativo (-), término aerodinámico (+) y la suma de ambos (-o).

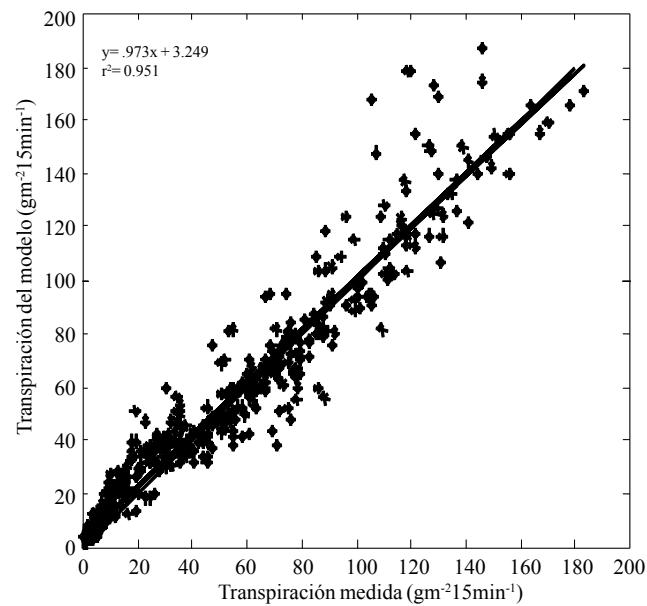


Figura 12. Gráfica de regresión entre la transpiración medida y estimada por el modelo y gráfica 1:1 de todos los días.

Cuadro 1. Parámetros estadísticos de la calibración y validación del modelo de Baille.

	Y = ax + b						
	Coeficiente A	Coeficiente B	r ²	SCME	SSE	a	B
Calibración del modelo	0.3723	30.44	0.963	7.841	2.3490	0.939	3.116
Validación del modelo	-	-	0.951	8.82	5.9580	0.973	3.249

Discusión

Calibración

Dadas las diferencias entre las condiciones ambientales de Almería, España y Chapingo Estado de México, los valores de los parámetros radiativo y aerodinámico (0.59 y 19.1) del modelo de transpiración de Baille calculados por Medrano *et al.* (2008) no permiten obtener un buen ajuste entre predicciones y mediciones correspondientes al experimento llevado a cabo en Chapingo, México. Sin embargo, mediante el proceso de calibración realizado se obtuvieron los valores de los parámetros del modelo, mostrados en el Cuadro 1 que reflejan un menor peso para la parte radiativa y uno mayor para la porción aerodinámica del modelo.

El nivel de ajuste logrado mediante la estimación de los parámetros más importantes del modelo de transpiración de Baille fue muy bueno como se observa en la gráfica de dispersión entre la transpiración medida y la estimada (Figura 8) y en la gráfica 1:1 y el coeficiente de determinación correspondiente a la ecuación de regresión lineal para los datos calibrados donde se obtuvo un ajuste de $r^2=0.963$ y parámetros de la regresión ($y=a x + b$ donde $a=0.939$ y $b=3.116$), y un SCME= 7.841 (raíz del cuadrado medio del error), y SSE= 2.3490 (suma del cuadrado debida al error).

El nivel de ajuste del modelo a las mediciones después del proceso de calibración mostrado en las Figuras 5, 6 y 7 está en correspondencia con la evaluación cuantitativa mostrada en la Figura 8. Los resultados de nuestra calibración del modelo de Baille son similares a aquellos obtenidos por Sánchez *et al.*, 2011 y Sánchez *et al.*, 2008, en lo que se refiere al coeficiente radiativo y son diferentes respecto al parámetro aerodinámico. Una diferencia importante en la calibración del modelo de transpiración de Baille llevado a cabo por Sánchez *et al.* (2008 y 2011) es que se determinaron dos valores para el parámetro aerodinámico, uno para la noche y otro para el día.

Validación

Se sabe que para que un modelo calibrado pueda ser usado es necesario que este haya sido evaluado usando conjuntos de datos diferentes a los usados en la calibración, con la finalidad de que se muestre la eficiencia de la predicción que este pueda tener. Por lo que en este trabajo se realizó la validación con 8 días de datos, (para 09, 10, 11, 12, 15,

16, 17, 18 de julio) utilizando valores de los coeficientes A y B de la calibración hecha al modelo (0.372 y 30.44) respectivamente, para un coeficiente de extinción de luz de 0.7, donde de acuerdo a lo que se aprecia en la Figura 9 y 10 el ajuste muestra ser bastante aceptable y para validar este hecho, es menester el uso de otras herramientas que permitan hacer valido el argumento anterior, por lo que se presenta también la grafica 1:1 y la curva de regresión (Figura 12) para los datos medidos versus los datos estimados por el modelo, teniéndose las estadísticas siguientes, una $r^2=0.951$ y los parámetros del ajuste son ($y=a x + b$ para $a=0.973$ y $b=3.249$). RMSE= 8.82 y SSE= 5.958.

Comparando los resultados obtenidos en la validación del modelo contra los obtenidos en la calibración puede apreciarse que son similares tomando en cuenta que se empleó el doble de datos en el proceso de validación. En especial el nivel de ajuste es muy bueno como puede apreciarse en las estadísticas mostradas en el Cuadro 1. En general los resultados obtenidos muestran que el término aerodinámico del modelo de Baille, aporta alrededor de 46-50% de la transpiración total para la mayoría de los días, como se muestra en la Figura 7. Los resultados encontrados en esta investigación son similares a los encontrados por otros investigadores (Boulard y Jemma 1993).

Conclusión

El modelo de transpiración de Baille permite predecir en forma aceptable el comportamiento de las tasas de transpiración de un cultivo de jitomate bajo condiciones de invernadero y condiciones de clima templado. Aparentemente para las condiciones climáticas y de cultivo estudiadas, el término aerodinámico del modelo tiene un aporte de 46-50% de la transpiración total del cultivo.

Literatura citada

- Bass, R. and van Rijssel, E. 2006. Transpiration of glasshouse rose crops: evaluation of regression models. *Acta Hortic.* 718: 547-554.
- Baille, B.; Baille, A. and Claude L. 1994. A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs climate factors and leaf area. *Scientia Horticulturae* 59: 217-232.

- Boulard, T. and Jemma, R. 1993. Greenhouse tomato crop transpiration model application to irrigation control. *Acta Hortic.* 381-387.
- Goudriaan, J. and van Laar, H. H. 1994. Modeling potential crop growth processes. Textbook with exercises. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. 238 pp.
- Jolliet, O. and Bailey, B. J. 1992. The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses: measurements and models comparison. *Agric. For. Meteorol.* 58:43-62.
- Medrano, E. C. 1999. Gestión de riego en cultivo de pepino (*Cucumis Sativus L.*) en sustrato: evaluación de la transpiración durante la ontogenia. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 236 pp.
- Medrano, E.; Lorenzo, P.; Cruz, S. and Ignacio, M. 2005. Evaluation and modelling of greenhouse cucumber-crop transpiration under high and low radiation condicitions. *Scientia Horticulturae.* 105:163-175.
- Medrano, E.; Alonso, F.; Cruz, S. and Lorenzo, P. 2008. Incorporation of a model to predict crop transpiration in a commercial irrigation equipment as a control method for water supply to soilless horticultural Crops. *Acta Hort.* 801:1325-1330.
- Monteith, J. L. and Unsworth, M. H. 2008. Principles of environmental physics. Third edition. Academic Press. Amsterdam. 414 pp.
- Prenger, J. J.; Fynn, P. R. and Hansen, C. R. 2002. A comparison of four evapotranspiration models in a greenhouse environment. *ASAE.* 45(6):1779-1788.
- Sánchez, J. A.; Rodríguez, F.; Guzmán, J. L. and Berenguel, M. 2011. Modelling of tomato crop transpiration dynamics. *Acta Hortic.* 893:729-738.
- Sánchez, J. A. 2008. Modelado de la transpiración de un cultivo de tomate bajo invernadero para el diseño de sistemas de control de riego. In: XXIX Jornadas de Automática. Tarragona, España. 8 p.
- Stanghellini C. 1987. Transpiration of greenhouses crops. An aid to climate management. Instituut voor Mechanisatie Arbeid en Gebouwen, Wageningen Netherlands. Dissertation, internally prepared. 150 pp.
- The, C. B. S. 2006. Introduction to mathematical modeling of crop growth. 1^a (Ed.). BrownWalker Press. 244 pp.
- Von Zabelitz, C. 2011. Integrated Greenhouse systems for mild climates. Climate, conditions, design, construction, maintenance, climate control. Springer, Heidelberg. 1st (Ed.) (October 1, 2010). 373 pp.