

ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE TOMATE USANDO EL MODELO INTERACCIÓN SUELO-VEGETACIÓN-ATMÓSFERA (ISBA)

Estimation of tomato evapotranspiration using the interaction between soil, biosphere and atmosphere (ISBA) model

Albert Oliosio¹, Samuel Ortega-Farías²*, Héctor Valdés³ y Rodrigo Antonioletti²

ABSTRACT

A study was carried out to evaluate the real evapotranspiration (*ET*) estimated by the "Interaction among Soil-Biosphere-Atmosphere" (ISBA) model on a tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) crop, which was located at the Panguilemo Experimental Station of the Universidad de Talca (35°23' S lat, 71°40' W long, 110 m.o.s.l.). For that purpose, a Bowen system installed in the central part of the tomato crop was used to measure latent heat flux (*LE*), net radiation flux (*Rn*), soil heat flux (*G*) and sensitive heat flux (*H*) during 1998-1999 season. Simultaneously, an automatic meteorological station installed over grass under reference conditions was used to measure air temperature, relative humidity, wind speed, solar radiation, and precipitation. The actual evapotranspiration estimated by the ISBA model was evaluated using latent heat fluxes measured by the Bowen system. Results indicated that the model was able to estimate *LE* on an hourly basis with a root mean square error (RMSE) of 65 W m⁻² and a bias less than 6 W m⁻². On a daily basis, the model estimated *ET* with RMSE and bias of 0.50 mm d⁻¹ and 0.11 mm d⁻¹, respectively. The sensitivity analysis indicated that with errors (or variations) of ± 30% in the values of the main input variables (leaf area index, crop height, albedo and minimum stomatal resistance), the ISBA model was able to estimate the *ET* with errors less than 6%.

Key words: water requirements, Bowen ratio, latent heat flux, *Lycopersicon esculentum*.

RESUMEN

Se realizó un estudio para evaluar la evapotranspiración real (*ET*) estimada por el modelo interacción suelo-vegetación-atmósfera (ISBA) sobre un cultivo de tomates (*Lycopersicon esculentum* Mill.), el cual estaba ubicado en la Estación Experimental Panguilemo de la Universidad de Talca (35°23' lat. Sur; 71°40' long. Oeste, 110 m.s.n.m.). Con este objetivo se usó un sistema de Bowen instalado en la parte central del cultivo tomates para medir el flujo de calor latente (*LE*), flujo de radiación neta (*Rn*), flujo de calor sensible (*H*) y flujo de calor del suelo (*G*) durante la temporada 1998-1999. Simultáneamente, una estación meteorológica automática instalada sobre pasto en condiciones de referencia fue utilizada para medir temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y precipitaciones. La *ET* actual estimada por el modelo ISBA fue evaluada usando el flujo de calor latente obtenido del sistema de Bowen. Los resultados de este estudio indicaron que el modelo ISBA fue capaz de estimar *LE* horario con una desviación media (bias) de 6 W m⁻² y un error cuadrático medio (RMSE) equivalente a 65 W m⁻². En términos diarios, el modelo ISBA estimó la *ET* con una bias y un RMSE de 0,11 mm d⁻¹ y 0,50 mm d⁻¹, respectivamente. El análisis de sensibilidad indicó que con errores (o variaciones) de ± 30% en los valores de las principales variables de entrada (índice de área foliar, altura del cultivo, albedo y resistencia estomática mínima), el modelo ISBA fue capaz de estimar adecuadamente la *ET* con errores menores al 6%.

Palabras clave: requerimientos hídricos, relación de Bowen, flujo de calor latente, *Lycopersicon esculentum*.

¹ Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Climat, Sol et Environnement, Domaine Saint-Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon, Cedex 9, Francia. E-mail: olioso@avignon.inra.fr

² Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Agrarias, Centro de Investigación y Transferencia en Riego Agroclimatología (CITRA), Casilla 747, Talca, Chile. E-mail: sortega@utalca.cl *Autor para correspondencia.

³ UMR SYSTEM INRA, CIRAD TA40/01, Av. Agropolis, 34398 Montpellier, Cedex 5, Francia.

Recibido: 24 de marzo de 2004. Aceptado: 6 de septiembre de 2004.

INTRODUCCIÓN

La evapotranspiración real (ET) es una de las principales variables de entrada en la metodología para estimar el consumo de agua del cultivo durante su ciclo de crecimiento. La metodología más ampliamente usada para estimar el consumo de agua de los cultivos es la recomendada por Allen *et al.* (1998) en la publicación de la FAO, donde la ET es estimada en función de la evapotranspiración de referencia (ET_r) y de un coeficiente de cultivo (K_c). La ET_r es calculada usando la ecuación de Penman-Monteith que requiere mediciones simultáneas de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar. El coeficiente K_c depende del estado fenológico del cultivo y de las condiciones específicas de suelo y clima. Los mayores errores de esta metodología están asociados a los valores de K_c , pues éstos no pueden ser usados en forma generalizada y requieren de una calibración local (Ortega-Farías *et al.*, 2003).

Por otro lado, investigaciones recientes indican que es posible estimar directamente la ET para diferentes cultivos, sin la necesidad de utilizar los coeficientes de cultivo (Olioso *et al.* 1999; Rana y Katerji 2000; Ortega-Farías *et al.*, 2004). Para esto existen diversos modelos, entre los que destacan los modelos de transferencia suelo-vegetación-atmósfera (TSVA), cuya aplicación requiere de información de suelo, clima y una caracterización del follaje para estimar la ET en diversas especies vegetales. Por su fuerte base física y fisiológica, los modelos TSVA han sido usados en estudios hidrológicos, meteorológicos y agronómicos, para estimar en forma continua la evapotranspiración real y el balance hídrico del suelo sobre diversas estructuras vegetales, tales como cultivos, praderas y estructuras más complejas como bosque nativo y forestal que cubren parcial o totalmente el suelo (Noilhan y Planton 1989; Braud 1998; Calvet *et al.* 1998b; Olioso *et al.*, 1999).

Esto ha permitido hacer un análisis de la variabilidad espacial y temporal de la ET en diversas regiones agrícolas del mundo. Al respecto, la dirección meteorológica de Francia desarrolló un modelo TSVA llamado modelo de

interacción suelo-vegetación-atmósfera (ISBA), que forma parte de un conjunto de modelos utilizados para el pronóstico de las condiciones climáticas de Francia y parte de Europa (Noilhan y Planton 1989; Mahfouf *et al.*, 1995; Noilhan y Mahfouf, 1996). Comparado con otros modelos TSVA, el modelo ISBA es simple, requiere pocas variables de entrada (Olioso *et al.*, 2002a). Este modelo necesita mediciones de clima, vegetación y suelo, para simular la temperatura del follaje o cubierta vegetal (T_s), temperatura promedio del suelo (T_2), contenido volumétrico de agua superficial (w_G) y contenido volumétrico promedio de agua en la zona efectiva de raíces (w_2). Además, el modelo ISBA es capaz de simular sobre una cubierta vegetal el flujo de radiación neta (R_n), el flujo de calor sensible (H), el flujo de calor del suelo (G) y el flujo de calor latente (LE). En relación al consumo de agua de los cultivos, el flujo de calor latente es la energía utilizada para evaporar el agua desde la planta y el suelo (evapotranspiración).

Una vez establecida las condiciones de suelo y las características de la arquitectura del cultivo, el modelo ISBA estima la ET en base a las condiciones climáticas tales como temperatura, humedad relativa, velocidad de viento y radiación solar. Actualmente, esto es posible gracias a los avances tecnológicos en el campo de la instrumentación meteorológica, del almacenamiento de datos y de la computación, que permiten medir y procesar la información en intervalos cortos de tiempo (1 hora o 30 minutos) en forma rápida y eficiente (Ortega-Farías *et al.*, 2003).

En Chile no existe información sobre la utilización de modelos TSVA para estimar el consumo de agua de los cultivos y con ello optimizar el uso del recurso hídrico en el predio. El objetivo de esta investigación fue evaluar el modelo ISBA para estimar directamente la evapotranspiración real de un cultivo de tomates bajo las condiciones climáticas de Talca, VII Región. Además, este estudio incluyó un análisis de sensibilidad para analizar los efectos de las principales variables de entrada (índice de área foliar, altura del cultivo, albedo y resistencia estomática mínima) del modelo ISBA sobre la estimación de la ET .

Descripción general del modelo ISBA. Debido a que existe una detallada descripción del modelo ISBA en varias investigaciones (Noilhan y Planton, 1989; Jacquemin y Noilhan, 1990; Noilhan and Mahfouf, 1996), sólo una breve descripción del algoritmo matemático, utilizado para calcular la ET , será explicada en este artículo. En este caso, la ET (en $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) de los cultivos se puede calcular como la suma de la evaporación del suelo (E_G en $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y la transpiración de la planta (Tr en $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Estos dos parámetros son estimados usando las ecuaciones del balance de energía, balance hídrico y transferencia turbulenta para el calor y vapor de agua. Usando el balance de energía la ET se puede expresar como:

$$\lambda \cdot ET = \lambda \cdot E_G + \lambda \cdot Tr = Rn - H - G = LE \quad (1)$$

donde λ es el calor latente de vaporización (J kg^{-1}). Los flujos de Rn , H , G y $LE (= \lambda \cdot ET)$ se expresan en W m^{-2} .

La transpiración y evaporación están expresadas como flujos turbulentos de vapor de agua hacia la atmósfera, teniendo en cuenta las resistencias del suelo y de los estomas al flujo de agua, según las ecuaciones 2 y 3, respectivamente:

$$E_G = \frac{(1-veg)\rho_a}{ra} (h_u \cdot q_{sat}(T_s) - q_a) \quad (2)$$

$$Tr = \frac{veg \cdot \rho_a}{ra + Rs} (q_{sat}(T_s) - q_a) \quad (3)$$

donde veg es la fracción del suelo cubierto por la vegetación o follaje (varía entre 0 para un suelo sin vegetación y 1 para un suelo cubierto completamente con follaje); ρ_a es la densidad del aire (kg m^{-3}); h_u es la humedad relativa en la superficie del suelo (fracción); q_a es la humedad específica del aire (g kg^{-1}); q_{sat} es la humedad específica de saturación (g kg^{-1}) en función de la temperatura del follaje o cubierta vegetal (T_s), la cual se estima a partir de la ecuación de balance de energía; Rs es la resistencia promedio que integra la resistencia total del follaje, llamada también resistencia de la cubierta vegetal a la transferencia de vapor de agua (s m^{-1}) y ra es la resistencia aerodinámica (s m^{-1}).

La variación de h_u se puede calcular como una función de la humedad superficial del suelo:

$$h_u = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{w_G - \pi}{w_{CC}} \right) \right] \quad \text{si } w_G \leq w_{CC} \quad (4)$$

$$h_u = 1, \quad \text{si } w_G > w_{CC}$$

donde w_G es el contenido volumétrico de agua en la superficie del suelo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) y w_{CC} el contenido volumétrico de humedad del suelo a capacidad de campo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

La resistencia de la cubierta vegetal (Rs) puede ser descrita como una función del índice de área foliar (IAF) y de la resistencia estomática:

$$Rs = \frac{Rs_{min}}{IAF} F_1 \cdot F_2^{-1} \cdot F_3^{-1} \cdot F_4^{-1} \quad (5)$$

donde, Rs_{min} es la resistencia estomática mínima (s m^{-1}), y las funciones F_1 , F_2 , F_3 y F_4 explican el efecto de la radiación fotosintéticamente activa (PAR), la disponibilidad de agua en la zona de raíces, el déficit de presión de vapor y la temperatura sobre la resistencia estomática, respectivamente. Estas funciones han sido descritas por Noilhan y Planton (1989), Jacquemin y Noilhan (1990) y Noilhan y Mahfouf (1996). Sin embargo, es importante describir la función F_2 , pues tiene el mayor efecto sobre el comportamiento de Rs , ya que depende de la humedad del suelo en la zona efectiva de raíces (w_2):

$$F_2 = (w_2 - w_{PMP}) / (w_{CC} - w_{PMP}), \text{ si}$$

$$w_{PMP} \leq w_2 \leq w_{CC} \quad (6)$$

$$F_2 = 1, \text{ si } w_2 > w_{CC}$$

$$F_2 = 0, \text{ si } w_2 < w_{PMP}$$

donde w_{PMP} es el contenido volumétrico de agua del suelo en su punto de marchitez permanente ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

Los variables w_G y w_2 , en el balance hídrico del suelo se derivan a través del método de la fuerza-restauración de Deardorff (1977) adaptado por Noilhan y Mahfouf (1996).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para evaluar la *ET* estimada por el modelo ISBA se realizó un ensayo en la Estación Experimental Panguilemo perteneciente a la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Talca (35°23' lat. Sur, 71°40' long. Oeste; 110 m.s.n.m.), durante la temporada 1998-1999. Para esto se estableció una parcela experimental de 0,8 ha cultivada con tomate industrial (*Lycopersicon esculentum* Mill.), híbrido Rido I-4, el cual se mantuvo en óptimas condiciones de manejo agronómico y regado por surcos. El trasplante del tomate se realizó el 28 de octubre de 1998 y las plantas se distribuyeron a intervalos de 0,2 m sobre la hilera y 1,2 m entre hileras.

El clima de la región es de tipo mediterráneo subhúmedo, con una pluviometría media anual de 734 mm distribuida en un 75% entre los meses de invierno (mayo a agosto), un 15% en primavera, y 3 a 4% en verano. La temperatura media diaria durante el período experimental fue de 20°C y la temperatura máxima media alcanzó a 30°C. El suelo pertenece a la serie Talca (tipo Alfisol), cuya textura es franca a arcillosa en los primeros 40 cm, y a partir de éstos posee una textura

arcillosa que limita el desarrollo de las raíces. Para los primeros 40 cm de profundidad, los valores volumétricos promedios de la capacidad de campo y punto de marchitez permanente fueron 32,7% y 19,4%, respectivamente.

En la parte central de la parcela experimental de tomates se ubicó un sistema de Bowen (Campbell Scientific, Inc., Logan, USA) para medir los componentes del balance de energía en intervalos de 20 min (Cuadro 1). También se instaló una estación meteorológica automática (EMA) (Adcon Telemetry, A730, Austria) sobre un pasto en condiciones de referencia para medir las variables climáticas utilizadas como entrada en el modelo ISBA (Cuadros 2 y 3). Es importante mencionar que la EMA se instaló a una distancia de 50 m del cultivo de tomates. Además, el contenido volumétrico de agua en el suelo se midió semanalmente con un equipo TDR (Time Domain Reflectometry) (modelo 6050X1, Soil Moisture Equipment Corp., Sta. Bárbara, California, USA) para evaluar la programación del riego (Figura 1). Para esto se instalaron 18 pares de guías de 30 cm de largo distribuidas uniformemente sobre surcos e hileras en toda la parcela experimental.

Cuadro 1. Variables meteorológicas y componentes del balance de energía medidos por un sistema de Bowen ubicado en la parte central de un cultivo de tomates.

Table 1. Meteorological variables and energy balance components measured by a Bowen system located in the central part of a tomato crop.

Variables	Instrumento	Modelo	Unidad	Ubicación de sensores
Temperatura del aire (T_a)	Platinum probe	HMP35C Probe	°C	1,5 m sobre la superficie del suelo.
Humedad relativa del aire (H_r)	Capacitive probe	HMP35C Probe	%	1,5 m sobre la superficie del suelo.
Velocidad del viento (u_a)	Anemómetro	03001	m s ⁻¹	2,3 m sobre la superficie del suelo.
Gradiente de temperatura del aire ¹ (ΔT_a)	Termocuplas	FWTC05	°C	0,6 y 1,2 m sobre la superficie del suelo.
Gradiente de presión de vapor ¹ (Δe_a)	Higrómetro	Dew-10	kPa	0,6 y 1,2 m sobre la superficie del suelo.
Radiación neta ¹ (R_n)	Radiómetro neto	REBS Q 7-1	W m ⁻²	1,2 m sobre la superficie del suelo.
Temperatura de suelo ² (T_g)	Termocuplas	TCAV-L	°C	2 y 6 cm bajo la superficie del suelo.
Flujo de calor ² (HS)	Placas flujo de calor	HFT3-L	W m ⁻²	Una sobre la hilera y otra en el surco: ambas ubicadas a 8 cm bajo la superficie del suelo.

Fuente: Campbell Scientific, Inc. (1996).

¹Variables usadas por el sistema de Bowen para estimar el calor latente o evapotranspiración real.

²Variables usadas para estimar el calor de suelo.

Cuadro 2. Variables climáticas medidas por la estación meteorológica automática localizada sobre un cultivo de pasto en condiciones de referencia.

Table 2. Climatological variables measured by an automatic weather station located over a grass crop in reference conditions.

Variables	Instrumento	Modelo	Unidad	Ubicación de sensores
Temperatura del aire (T_a)		Combi 730SEN RH730	°C	1,5 m sobre la superficie del suelo.
Humedad relativa del aire (H_r)		Combi 730SEN RH730	%	1,5 m sobre la superficie del suelo.
Velocidad del viento (u_a)		A730WIN	m s ⁻¹	2,3 m sobre la superficie del suelo.
Radiación solar (R_g)	Piranómetro	MS-020VM (número A730GR - Adcon)	W m ⁻²	2,5 m sobre la superficie del suelo.
Precipitaciones (P_g)	Pluviómetro	Rain-o-matic	mm	2,3 m sobre la superficie del suelo.

Los archivos con los datos de entrada del modelo ISBA se constituyeron a partir de mediciones climáticas de la EMA y de las estimaciones del *IAF* y altura del cultivo (Cuadro 3). Las simulaciones de los componentes del balance de energía y *ET* diaria se compararon con las mediciones del sistema de Bowen, el cual ha sido usado por varios investigadores para evaluar o calibrar modelos de *ET* y *ETr* (Ortega-Farías *et al.*, 1995; Rana

et al., 1997; Alves y Pereira, 2000; Kato *et al.*, 2004). Tanto para el modelo ISBA y sistema de Bowen, la *ET* diaria se calculó como una integración de los valores horarios de *LE* obtenidos durante las 24 h del día. La evaluación de las comparaciones se realizó calculando la desviación media (Bias) y el error cuadrático medio (RMSE) entre las observaciones del sistema de Bowen y las estimaciones del modelo ISBA.

Cuadro 3. Variables de entrada del modelo ISBA (Interacción suelo-vegetación-atmósfera).

Table 3. Input variables of the ISBA model (Interaction between soil, biosphere and atmosphere).

SUELO	Símbolo	Valor	Observación
Fracción de arena, %		42,7	Medida
Fracción de arcilla, %		30,5	Medida
Profundidad de suelo, m	d_2 y d_3	0,6 y 2,0	Medida
Capacidad de campo, m ³ m ⁻³	w_{CC}	0,33	Medida
Punto de marchitez permanente, m ³ m ⁻³	w_{PMP}	0,19	Medida
VEGETACIÓN			
Fracción del suelo cubierto con vegetación	veg	Entre 0,5 y 0,7	Estimación por fenología y mediciones
Albedo	α	0,20	Medida
Emisividad	ε	0,98	Estimada
Altura de la vegetación, m	H_c	Entre 0,3 y 0,5	Estimación por fenología y mediciones
Índice de área foliar	IAF	Entre 1,5 y 3	Estimación por fenología y mediciones
Resistencia estomática mínima, s m ⁻¹	Rs_{min}	50	Estimada
ATMÓSFERA			
Radiación solar, W m ⁻²	R_g		Medición continua
Radiación atmosférica, W m ⁻²	R_a		Calculada
Temperatura del aire, °C	T_a		Medición continua
Humedad relativa, %	H_r		Medición continua
Velocidad del viento, m s ⁻¹	u_a		Medición continua
Precipitaciones, mm	P_g		Medición continua
Cantidad de agua aplicada, mm	R		Estimada

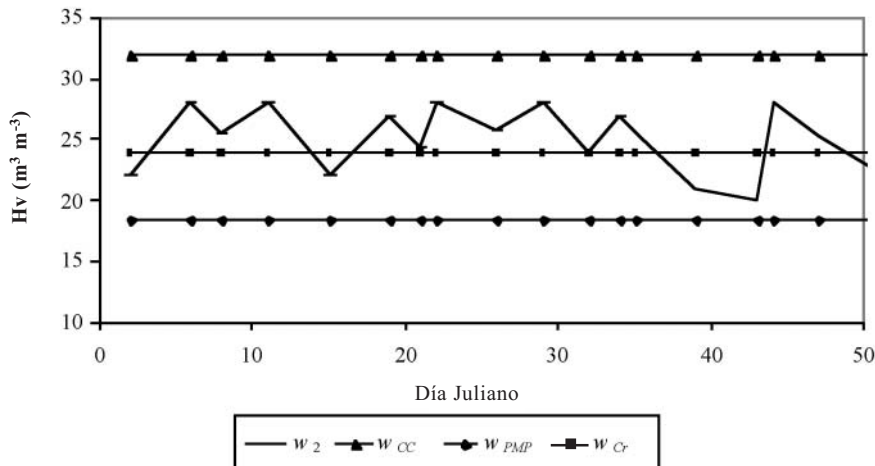


Figure 1. Evolución del contenido de agua volumétrica del suelo (w_2). Valores de capacidad de campo (w_{CC}), punto de marchitez permanente (w_{PMP}) y humedad crítica (w_{Cr}) son incluidos.

Figure 1. Evolution of the volumetric soil water content (w_2). Values of field capacity (w_{CC}), permanent wilting point (w_{PMP}) and critical moisture (w_{Cr}) are included.

RESULTADOS

Las comparaciones entre los valores de flujo de calor latente y de ET diaria estimados por el modelo ISBA y medidos por el sistema de Bowen se presentan en las Figuras 2, 3 y 4. Las Figuras 2 y 3 indican que existió una buena concordancia entre el flujo de calor latente medido y estimado sobre el cultivo de tomates bajo diferentes condiciones climáticas y niveles de humedad del suelo. En el caso de la Figura 2, los valores máximos de flujo de calor latente fueron de 450 W m^{-2} ($0,66 \text{ mm h}^{-1}$), los cuales fueron observados al mediodía. En concordancia con las mediciones del sistema de Bowen, los valores de LE estimados por el modelo ISBA disminuyeron con la disminución del contenido de agua (día juliano (DOY 43) y se incrementaron significativamente después del riego (DOY 44) (Figuras 1 y 2). En este caso, los valores máximos de LE estimados por el modelo ISBA fueron 310 W m^{-2} y 450 W m^{-2} para DOY 43 y DOY 44, respectivamente. Además, los máximos valores de LE (475 W^{-2}) fueron encontrados cuando el suelo presentó valores de humedad de $28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

El análisis estadístico presentado en el Cuadro 4 indica que el error cuadrático medio (RMSE)

calculado para el total de las observaciones fue de 65 W m^{-2} , con una mayor dispersión de puntos para valores de LE entre 300 W m^{-2} y 400 W m^{-2} (Figura 3). Sin embargo, la desviación media fue de 6 W m^{-2} , lo que indica que existió una baja desviación del modelo ISBA para estimar LE con respecto al sistema de Bowen. A título comparativo, estudios realizados con algunas versiones de modelos TSVA (incluyendo ISBA) en cultivos tales como trigo (*Triticum aestivum*), soya (*Glycine max*) y maíz (*Zea mays*) arrojan un RMSE entre 40 y 80 W m^{-2} (Calvet *et al.*, 1998b, Oliosio *et al.* 2002a). Con respecto a los otros componentes del balance de energía, el estudio indicó que H y G presentan un RMSE más elevado en comparación a los encontrados para el LE , mientras que las simulaciones para Rn presentaron el error más bajo en el estudio (Cuadro 4). Sin embargo, los errores en la estimación de H y G no afectaron en forma significativa las simulaciones de LE calculadas por el modelo ISBA (Ecuación 1). Por otro lado, el flujo de Rn es la fuerza principal que determina, en mayor medida, las pérdidas de agua de una cubierta vegetal cuando el agua en el suelo no es limitante. En este caso, el modelo ISBA estimó el flujo de Rn con un RMSE de 38 W m^{-2} , valor que se encuentra en el rango de precisión del radiómetro neto (Ortega-Farías *et al.*, 2004).

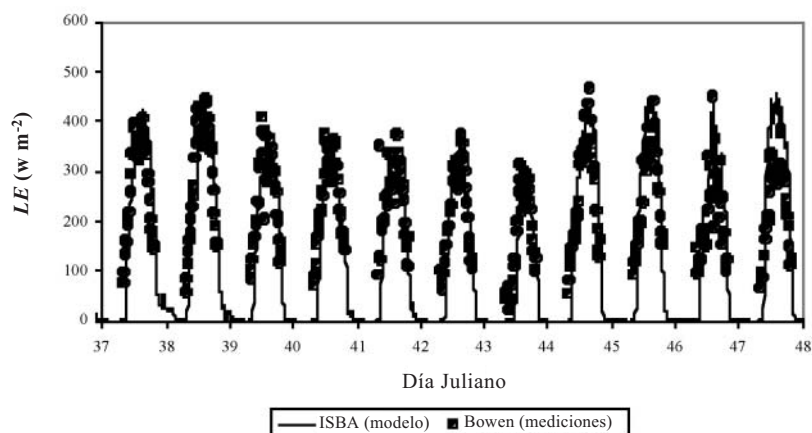


Figura 2. Variación horaria del flujo de calor latente (LE) estimado por el modelo ISBA (Interacción suelo-vegetación-atmósfera) (línea) y medidos por el sistema de Bowen (círculos).

Figure 2. Hourly variation of the latent heat flux (LE) estimated by the ISBA (Interaction between soil, biosphere and atmosphere) model (solid line) and measured by the Bowen ration system (circles).

En este estudio se encontró una buena concordancia entre la ET diaria estimada por el modelo ISBA y medida por el modelo Bowen, donde los valores de RMSE y Bías fueron de 0,50 mm d⁻¹ y 0,11 mm d⁻¹, respectivamente (Figura 4 y Cuadro 4). En este caso, la estimación presenta una baja desviación, lo que se traduce en una sobrestimación de la ET de menos de 6 mm para el período de estudio, con un total simulado de 309 mm. Es importante mencionar que el cultivo de tomates fue mantenido en buenas condiciones de humedad del suelo durante el desarrollo del experimento, ya que los valores de w_2 fueron mantenidos por sobre la humedad crítica, la cual

fue calculada usando un criterio de riego del 60% (Figura 1). Los menores niveles de humedad del suelo fueron encontrados en DOY 43 ($w_2 = 20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), donde el valor de ET calculado por el modelo ISBA y obtenido por el sistema de Bowen fueron de 2,7 y 3,0 mm d⁻¹, respectivamente. Por otro lado, la mayor disminución de la ET está vinculada a la disminución de la radiación solar debido a la presencia de nubes, como por ejemplo DOY 11, DOY 16 y DOY 39 (Figura 4).

Para evaluar los errores introducidos por los parámetros de entrada del modelo ISBA sobre la estimación de la ET diaria, se realizó un análisis

Cuadro 4. Análisis estadístico para el balance de energía y evapotranspiración real de un cultivo de tomates estimados por el modelo ISBA (Interacción suelo-vegetación-atmósfera).

Table 4. Statistical analysis of energy balance and actual evapotranspiration of a tomato crop estimated by the ISBA (Interaction between soil, biosphere and atmosphere) model.

	RMSE	Bias	Número de observaciones
Flujo de radiación neta horaria, Rn	38 W m ⁻²	-10 W m ⁻²	492
Flujo de calor sensible horaria, H	74 W m ⁻²	-21 W m ⁻²	492
Flujo de calor del suelo horaria, G	81 W m ⁻²	8 W m ⁻²	492
Flujo de calor latente horaria, LE	65 W m ⁻²	6 W m ⁻²	492
Evapotranspiración real diaria, ET	0,50 mm d ⁻¹	0,11 mm d ⁻¹	41

RMSE = error cuadrático medio entre las estimaciones del modelo ISBA y mediciones del sistema de Bowen; Bías = desviación media;

$$ET = \sum_{i=1}^{24} \frac{LE(i)}{\lambda}$$

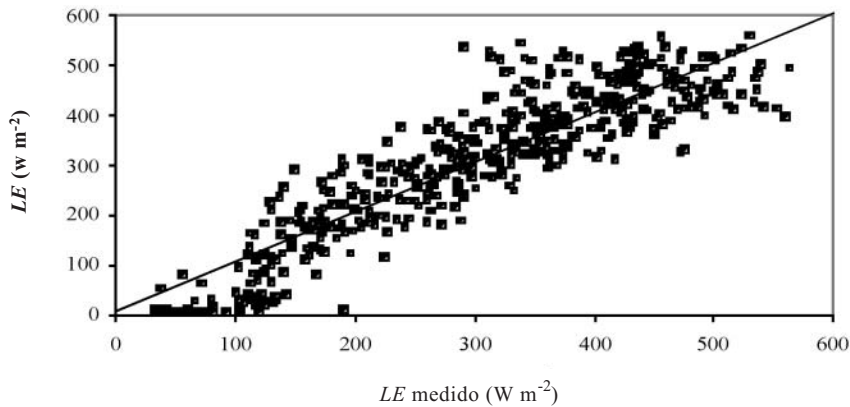


Figura 3. Comparación horaria entre el calor latente (LE) estimado por el modelo ISBA (Interacción suelo-vegetación-atmósfera) y medido por el sistema de Bowen.

Figure 3. Hourly comparison between the latent heat flux (LE) estimated by the ISBA (Interaction between soil, biosphere and atmosphere) model and measured by the Bowen system.

de sensibilidad que consistió en hacer variar los valores de IAF , Hc , albedo y Rs_{min} en \pm un 30% y los valores de w_{CC} y w_{PMP} en \pm 0,02 $m^3 m^{-3}$ (Cuadro 5). Dichos intervalos de variación son representativos de errores posibles en la información de entrada del modelo en condiciones prácticas de campo (pero probablemente exagerados como el caso del albedo). Para todos los valores de entrada, las variaciones acumuladas resultantes fueron inferiores a 6%. La acumulación de todos los efectos, incluyendo los peores casos, se tradujo en una variación de la ET diaria acumulada para el período de estudio de sólo 50 mm, que representan un 16% del total, y menos de 1 mm por día.

En este estudio, los errores observados en la estimación de LE , Rn , H y ET diaria (RMSE en Cuadro 4) fueron similares a los obtenidos en otros experimentos con el modelo ISBA y otros modelos TSVA (Calvet *et al.*, 1998b; Oliosio *et al.*, 2002a, 2002b). Sin embargo, los errores de las simulaciones de G de este estudio fueron mayores a los encontrados en la literatura. Calvet *et al.* (1998a), Wigneron *et al.* (1999) y Oliosio *et al.* (2002a) mostraron que es posible disminuir los errores en la simulación de los componentes del balance de energía realizando una calibración local de algunos de los parámetros de entrada del modelo ISBA, tales como Rs_{min} , w_{CC} , w_{PMP} ,

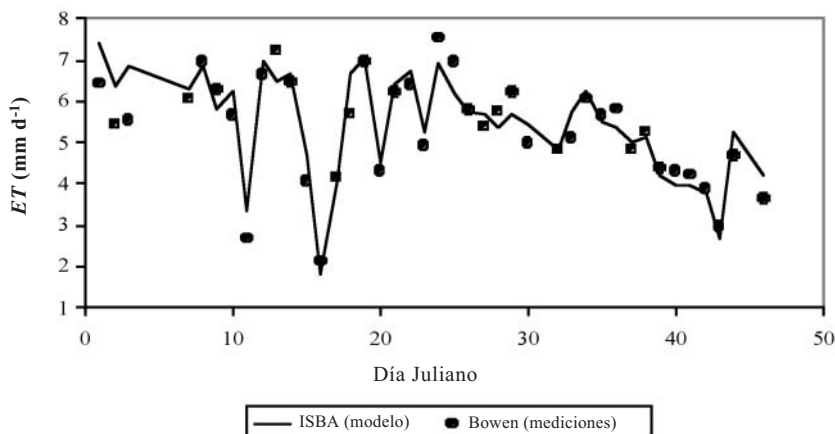


Figura 4. Evolución temporal de la evapotranspiración real diaria (ET) medida por el sistema de Bowen y estimada por el modelo ISBA (Interacción suelo-vegetación-atmósfera).

Figure 4. Temporal evolution of daily real evapotranspiration (ET) measured by the Bowen system and estimated by the ISBA (Interaction between soil, biosphere and atmosphere) model.

Cuadro 5. Análisis de sensibilidad del modelo ISBA (Interacción suelo-vegetación-atmósfera) para estimar la evapotranspiración real (ET) de un cultivo de tomate.

Table 5. Sensitivity analysis of the ISBA (Interaction between soil, biosphere and atmosphere) model for estimating real evapotranspiration (ET) of a tomato crop.

Datos de entrada	Variación de los datos de entrada	Variación absoluta de ET (mm)	Variación relativa de ET (%)	Variación promedio de ET (mm d ⁻¹)	RMSE (mm d ⁻¹)	Bias (mm d ⁻¹)
Índice de área foliar, IAF	X 0,7	-16	-5,2	-0,27	0,48	-0,24
	X 1,3	+8	+2,6	+0,13	0,74	+0,29
Altura de la vegetación, Hc	X 0,7	-4	-1,3	-0,07	0,45	+0,05
	X 1,3	+3	+1,0	+0,05	0,57	+0,15
Albedo (0,20)	X 0,7 (= 0,14)	+4	+1,3	+0,07	0,57	+0,18
	X 1,3 (= 0,26)	-4	-1,3	-0,07	0,47	+0,03
Resistencia estomática mínima Rs _{min} (50 s m ⁻¹)	X 0,7 (= 35 s m ⁻¹)	+11	+3,6	+0,18	0,77	+0,33
	X 1,3 (= 65 s m ⁻¹)	-10	-3,2	-0,17	0,44	-0,10
Capacidad de campo (0,327 m ³ m ⁻³)	-0,02 (= 0,307 m ³ m ⁻³)	-9	-2,9	-0,15	0,67	-0,06
	+0,02 (= 0,347 m ³ m ⁻³)	-7	-2,3	-0,11	0,44	-0,02
Punto de marchitez permanente (0,194 m ³ m ⁻³)	-0,02 (= 0,174 m ³ m ⁻³)	+6	+1,9	+0,10	0,54	+0,25
	+0,02 (= 0,214 m ³ m ⁻³)	-8	-2,6	-0,13	0,52	-0,07
Efecto combinado	Disminución	-50	-16,2	-0,83	1,04	-0,87
	Aumento	+25	+8,1	+0,42	1,51	+0,59

Bias = desviación media; RMSE = error cuadrático medio entre las estimaciones del modelo ISBA y mediciones del sistema de Bowen.

emisividad, conductividad termal e hidráulica del suelo. En algunos casos, la calibración del modelo ISBA para trigo, soya y barbecho permitió alcanzar valores de RMSE equivalentes a 40 W m⁻² para los simulaciones de *LE* (Calvet *et al.*, 1998b; Wigner *et al.*, 1999). Para lograr este nivel de exactitud en la estimación de *LE*, los valores de los parámetros de entrada fueron corregidos entre un 100 y 200%, e incluso se realizaron modificaciones de algunas ecuaciones incluidas en el algoritmo matemático del modelo ISBA.

Olioso *et al.* (2002a) indicaron que cambios en la conductividad termal del suelo pueden afectar significativamente las simulaciones de *G* y *H*, pero esta variable puede tener efectos casi nulos en las estimaciones de *LE* y *Rn*. En este caso, podría ocurrir un efecto compensatorio entre *G* y *H* a través de los cambios en la temperatura superficial del suelo, la cual tiene una influencia directa en las simulaciones de *G* y *H*, pero con signo opuesto (Cuadro 4). Esta situación podría haber reducido los errores en las simulaciones de flujo de calor latente. Otro factor que puede influenciar las simulaciones del modelo ISBA, está

relacionado con la heterogeneidad de la cubierta vegetal del cultivo de tomates, la cual puede generar una gran variabilidad espacial del flujo de calor del suelo (Noborio *et al.*, 1996) y propiedades aerodinámicas (McInnes *et al.*, 1994). Muchos procesos físicos incluidos en el modelo ISBA asumen una cubierta vegetal homogénea, en particular para la transferencia turbulenta del calor, vapor de agua en la atmósfera y transferencia de agua en el suelo.

En muchas situaciones es posible ajustar el modelo ISBA para reducir los errores en las simulaciones de la *ET* diaria. En nuestro caso, los parámetros del modelo ISBA no fueron ajustados debido a que la exactitud en las estimaciones de la *ET* diaria es suficiente para la programación del riego. El análisis de sensibilidad indicó que con errores (o variaciones) de hasta un 30% en los valores de *IAF*, *Hc*, albedo y *Rs_{min}*, el modelo ISBA fue capaz de estimar adecuadamente la *ET* diaria. Es interesante señalar que la ecuación de Penman-Monteith para estimar directamente la *ET* diaria (Ortega-Farías *et al.*, 2004), requiere como variable de entrada el contenido de agua en el suelo, radiación neta y calor del suelo, los

cuales son difíciles de medir en forma práctica. Cuando se usa el modelo ISBA u otro modelo TSVA, ellos internamente describen (calculan) cuantitativamente el balance hídrico y el balance de energía sobre la cubierta vegetal. En este caso, una adecuada descripción del suelo y del follaje es suficiente. De este modo sería interesante usar el modelo ISBA para simular la *ET* diaria en cultivos creciendo en condiciones de restricción hídrica. También, el modelo ISBA podría ser usado como una herramienta para desarrollar coeficientes de cultivo a nivel local o regional.

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio indicaron que el modelo ISBA fue capaz de estimar el calor latente horario con una desviación media (Bias) de 6 W m⁻² y un error cuadrático medio (RMSE) equivalente a 65 W m⁻². En términos diarios, el modelo ISBA estimó la evapotranspiración real

(*ET*) del cultivo de tomates con una Bias y un RMSE de 0,11 mm d⁻¹ y 0,50 mm d⁻¹, respectivamente. El análisis de sensibilidad indicó que con errores (o variaciones) de $\pm 30\%$ en los valores de las principales variables de entrada (índice de área foliar, altura del cultivo, albedo y resistencia estomática mínima), el modelo ISBA fue capaz de estimar adecuadamente la *ET* con errores menores al 6%.

RECONOCIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Programa de Cooperación Chileno-Francés ECOS-CONICYT N° C99U04 y el proyecto FONDECYT 1970309. También los autores desean agradecer a los ex-alumnos de la Escuela de Agronomía de la Universidad de Talca, colegas Rodrigo Calderón, Nelson Martelli, Claudio Donoso y Gonzalo Enríquez por su participación en la recolección de datos y mantención de la parcela experimental.

LITERATURA CITADA

- Allen, R., L. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. 300 p. Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy.
- Alves, I., and L.S. Pereira. 2000. Modelling surface resistance from climatic variables? *Agric. Water Manage.* 42:371-385.
- Braud, I., 1998. Spatial variability of surface properties and estimation of surface fluxes of a savannah. *Agric. For. Meteorol.* 89:15-44.
- Calvet, J.C., J. Noilhan, and P. Bessemoulin. 1998a. Retrieving the root-zone soil moisture from surface soil moisture or temperature estimates: a feasibility study based on field measurements. *J. Appl. Meteorol.* 37:371-386.
- Calvet, J., J. Noilhan, J. Roujean, P. Bessemoulin, M. Cabelguenne, A. Olioso, and J. Wigneron. 1998b. An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting site. *Agric. For. Meteorol.* 92:73-95.
- Deardorff, J.W. 1977. A parameterization of ground-surface moisture content for use in atmospheric prediction model. *J. Appl. Meteorol.* 16:1182-1185.
- Jacquemin, B., and J. Noilhan. 1990. Sensitivity study and validation of a land surface parameterization using the HAPEX-Mobilhy data set. *Boundary-Layer Meteorol.* 52:93-134.
- Kato, T., R. Kimura, and M. Kamichika. 2004. Estimation of evapotranspiration, transpiration ration and water-use efficiency from a sparse canopy using a compartment model. *Agric. Water Manage.* 65:173-191.
- Mahfouf, J.F., A.O. Manzi, J. Noilhan, H. Giordani, and M. Déqué. 1995. The land surface scheme ISBA within the Météo-France climate model ARPEGE. Part I: Implementation and preliminary results. *J. Climate* 8:2039-2057.
- McInnes, K.J., J.L. Heilman, and M.J. Savage. 1994. Aerodynamic conductances along a bare ridge-furrow tilled soil surface. *Agric. For. Meteorol.* 68:119-131.
- Noborio, K., K.J. McInnes, and J.L. Heilman. 1996. Two-dimensional model for water, heat, and solute transport in furrow-irrigated soil. II. Field evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:1010-1021.

- Noilhan, J., and J.F. Mahfouf. 1996. The ISBA land surface parameterization scheme. *Global and Planetary Change* 13:145-159.
- Noilhan, J., and S. Planton. 1989. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly Weather Rev.* 177:536-549.
- Olioso, A., I. Braud, A. Chanzy, D. Courault, L. Demarty, L. Kergoat, *et al.* 2002a. SVAT modeling over the Alpilles-Reseda experiment: comparing SVAT models over wheat fields. *Agronomie (Paris)* 22:651-668.
- Olioso, A., H. Chauki, D. Courault, and J.P. Wigneron. 1999. Estimation of evapotranspiration and photosynthesis by assimilation of remote sensing data into SVAT models. *Remote Sen. Environ.* 68:341-356.
- Olioso, A., Y. Inoue, J. Demarty, J.P. Wigneron, I. Braud, S. Ortega-Farías, *et al.* 2002b. Assimilation of remote sensing data into crop simulation models and SVAT models. p. 329-338. *In* J.A. Sobrino (ed.). *First International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*, Valencia, Spain. 16-20 September 2002. *Publicacions de la Universitat de València*, Valencia, España.
- Ortega-Farías, S., R. Calderón, N. Martelli, y R. Antonioletti. 2004. Evaluación de un modelo para estimar la radiación neta sobre un cultivo de tomate industrial. *Agric. Téc. (Chile)* 64:41-49.
- Ortega-Farías, S., R.H. Cuenca, and M. English. 1995. Hourly grass evapotranspiration in modified maritime environment. *J. Irrig. Drain. Eng.* 121:369-373.
- Ortega-Farías, S., A. Olioso, R. Antonioletti, and N. Brisson. 2004. Evaluation of the Penman-Monteith model for estimating soybean evapotranspiration. *Irrig. Sci.* 23:1-9.
- Ortega-Farías, S., T. Righetti, F. Sasso, C. Acevedo, F. Matus, and Y. Moreno. 2003. Site-specific management of irrigation water in grapevines. p. 55-71. *IX Latin American Congress on Viticulture and Enology; Symposium on Precision Viticulture*. 25 de noviembre de 2003. *Pontificia Universidad de Católica de Chile*, Santiago, Chile.
- Rana, G., and N. Katerji. 2000. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *Eur. J. Agron.* 13:125-133.
- Rana, G., N. Katerji, M. Mastrorilli, M. El Moujabber, and N. Brisson. 1997. Validation of model of actual evapotranspiration for water stressed soybeans. *Agric. For. Meteorol.* 86:215-224.
- Wigneron, J.P., A. Olioso, J.C. Calvet, and P. Bertuzzi. 1999. Estimating root-zone soil moisture from surface soil moisture data and soil-vegetation-atmosphere transfer modeling. *Water Resour. Res.* 35:3735-3745.