

Estimación de flujos de energía en superficie en un cultivo de maíz a partir de medidas de temperatura radiométrica del suelo y de la vegetación

J.M. Sánchez, V. Caselles, E. Valor y C. Coll

juan.m.sanchez@uv.es

Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica, Facultat de Física, Universitat de Valencia, C/Dr. Moliner 50, 46100 Burjassot, España.

Recibido el 20 de noviembre de 2007, aceptado el 6 de febrero de 2008

RESUMEN

En este trabajo mostramos una versión simplificada de un modelo de balance de energía de dos fuentes (STSEB), empleando un esquema desacoplado. Hemos aplicado el modelo STSEB a un amplio intervalo de proporciones de vegetación, usando datos de un cultivo de maíz. Comparando con las medidas realizadas desde una torre, hemos mostrado valores de RMSD entre ± 15 y ± 50 W m⁻² para la radiación neta y los flujos de calor en el suelo, sensible y latente. Hemos realizado un análisis de la sensibilidad del modelo a errores típicos en sus parámetros de entrada, mostrando errores relativos generalmente inferiores al $\pm 30\%$ en la estimación de flujos de calor latente.

PALABRAS CLAVE: STSEB, flujo de calor sensible, evapotranspiración, temperatura del suelo, temperatura de la vegetación.

ABSTRACT

A Simplified Two-Source Energy Balance (STSEB) model has been developed using a "patch" treatment of the surface flux sources. The feasibility of the STSEB approach under a full range in fractional vegetation cover conditions is explored using data from maize (corn) crop. Comparison with tower flux measurements yielded RMSD values between ± 15 and ± 50 W m⁻² for the retrieval of the net radiation, soil, sensible and latent heat fluxes. A sensitivity analysis of the STSEB approach to typical uncertainties in the required inputs showed relative errors generally lower than $\pm 30\%$ in latent heat flux estimates.

KEY WORDS: STSEB, sensible heat flux, evapotranspiration, soil temperature, canopy temperature.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha estudiado ampliamente la estimación de flujos de energía en superficie a través de técnicas de teledetección. Existen dos tipos de modelos de dos fuentes (suelo+vegetación) para estudiar los flujos energéticos en zonas de cobertura parcial de vegetación. Por un lado los modelos acoplados (Shuttleworth y Wallace, 1985), consideran un intercambio de energía entre el suelo y la vegetación y, por tanto, una interacción entre ambos componentes. Por otro lado, los modelos desacoplados asumen que los flujos actúan verticalmente y sin interacción entre el suelo y la vegetación. De acuerdo con estos últimos modelos se puede estable-

cer un balance energético independiente entre la atmósfera y cada uno de los componentes del sistema (Blyth and Harding, 1995).

Norman et al. (1995) propuso un modelo acoplado para estimar flujos energéticos a partir de medidas direccionales de temperatura de brillo de la superficie. Se trata del modelo TSEB (Two-Source Energy Balance). Habitualmente se dispone de la medida en un solo ángulo de observación de la temperatura efectiva de la superficie. Por este motivo, el modelo TSEB necesita incorporar en su esquema la ecuación de Priestley-Taylor (PT) aplicada a la vegetación, para obtener una solución inicial.

Si se conocen las temperaturas del suelo y de la vegetación por separado, por ejemplo a través de la descomposición de las medidas biangulares de la

temperatura efectiva de la superficie (ej. François, 2002), se pueden establecer por separado las ecuaciones del balance energético del suelo y de la vegetación, sin tener que recurrir a la ecuación de PT.

En este trabajo, se desarrolla un modelo simplificado de balance de energía de dos fuentes, que llamaremos STSEB (Simplified Two-Source Energy Balance), basado en la representación desacoplada del intercambio de energía del suelo y la vegetación. Este modelo permite la estimación de flujos de energía en superficie, sobre zonas de cobertura parcial, directamente a partir de las temperaturas del suelo y de la vegetación. Además, formando parte del modelo STSEB, se ha desarrollado un modelo sencillo para obtener la partición de la radiación neta en sus componentes de suelo y vegetación.

El objetivo de este trabajo es validar el modelo STSEB bajo condiciones variables de cobertura de vegetación, así como explorar la sensibilidad del modelo a las incertidumbres en los parámetros de entrada que se suelen presentar a escala regional. Para este trabajo se han empleado datos de teledetección, de cobertura de vegetación, y datos micrometeorológicos recogidos sobre un cultivo de maíz situado en una zona experimental en Beltsville (Maryland, USA) correspondientes al verano de 2004.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El balance de energía entre el sistema suelo-vegetación-atmósfera viene dado por (despreciando la advección y la fotosíntesis):

$$R_n = H + LE + G + F \quad (1)$$

donde R_n es el flujo de radiación neta (W m^{-2}), H es el flujo de calor sensible (W m^{-2}), G es el flujo de calor en el suelo (W m^{-2}), y F es el término de almacenamiento de calor en las plantas (W m^{-2}). Para estructuras de vegetación no muy altas, se puede despreciar el término F ya que su contribución al balance de energía global es muy pequeña y difícil de estimar. La temperatura radiométrica efectiva de la superficie en el mismo sistema, T_R (K), se puede obtener como una composición ponderada de la temperatura del suelo, T_s (K), y la temperatura de la vegetación, T_c (K):

$$T_R = \left[\frac{P_v(\theta)\varepsilon_c T_c^4 + (1 - P_v(\theta))\varepsilon_s T_s^4}{\varepsilon} \right]^{1/4} \quad (2)$$

donde ε_c , y ε_s , son las emisividades de la vegetación y del suelo, respectivamente, ε es la emisividad efectiva de la superficie, y $P_v(\theta)$ es la fracción de cubierta vegetal para el ángulo de visión θ . $P_v(\theta)$ se puede estimar a partir de medidas del índice de área foliar (LAI) a través de la ecuación:

$$P_v(\theta) = 1 - \exp\left(\frac{-0.5\Omega(\theta)LAI}{\cos(\theta)}\right) \quad (3)$$

donde el llamado *clumping factor*, $\Omega(\theta)$, caracteriza la heterogeneidad de la superficie (Anderson et al. 2005). Este factor permite adaptar las ecuaciones típicas a los casos heterogéneos. La dependencia de este factor con θ se puede estimar de la forma:

$$\Omega(\theta) = \frac{\Omega_0 \Omega_{\max}}{\Omega_0 + (\Omega_{\max} - \Omega_0) \exp(k\theta^p)} \quad (4)$$

donde Ω_{\max} está próximo a la unidad para ángulos acimutales perpendiculares a las hileras del cultivo, y p y k dependen de la estructura de la vegetación (Campbell and Norman, 1998).

La partición de los diferentes flujos totales en las componentes del suelo y de la vegetación se realizó de acuerdo con el esquema mostrado en la Figura 1. Según esta configuración, la suma de las contribuciones del suelo y de la vegetación al flujo total de calor sensible, H_s y H_c , respectivamente, viene ponderada por sus respectivas áreas parciales de la forma:

$$H = P_v H_c + (1 - P_v) H_s \quad (5)$$

donde H_s y H_c se expresan como:

$$H_c = \rho C_p \frac{T_c - T_a}{r_a^h} \quad (6a)$$

$$H_s = \rho C_p \frac{T_s - T_a}{r_a^a + r_a^s} \quad (6b)$$

donde ρC_p es la capacidad térmica volumétrica del aire ($\text{J K}^{-1} \text{m}^{-3}$), T_a es la temperatura del aire a la altura de referencia (K), r_a^h y r_a^a son las resistencias aerodinámicas del aire (m s^{-1}), y r_a^s es la resistencia aerodinámica del suelo (m s^{-1}) (ver detalles en Sánchez et al. 2007).

Para ser consistentes con la configuración del modelo desacoplado, se propone la siguiente partición del flujo de radiación neta, R_n , entre el suelo y la

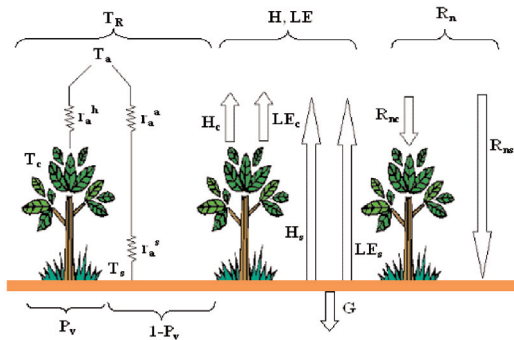


Figura 1. Esquema de flujos y resistencias correspondiente al modelo STSEB. Todos los símbolos están definidos en el texto.

vegetación:

$$R_n = P_v R_{nc} + (1 - P_v) R_{ns} \quad (7)$$

donde R_{nc} y R_{ns} son las contribuciones (valores por unidad de área de componente) de la vegetación y del suelo, respectivamente, al flujo total de radiación neta. Para estimarlas se establece un balance entre la radiación de onda larga y la radiación de onda corta de forma separada para cada componente:

$$R_{nc} = (1 - \alpha_c) S + \epsilon_c L_{sky} - \epsilon_c \sigma T_c^4 \quad (8a)$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha_s) S + \epsilon_s L_{sky} - \epsilon_s \sigma T_s^4 \quad (8b)$$

donde S es la radiación solar global ($W m^{-2}$), α_s y α_c son los albedos del suelo y de la vegetación, y σ es la constante de Stefan-Boltzmann. L_{sky} es la radiación de onda larga incidente ($W m^{-2}$).

Para combinar las contribuciones del suelo y de la vegetación, LE_s y LE_c , respectivamente, al flujo de calor sensible total, se usa una expresión similar a la ecuación (5):

$$LE = P_v LE_c + (1 - P_v) LE_s \quad (9)$$

De acuerdo con este esquema, se puede establecer un completo e independiente balance de energía entre la atmósfera y cada componente de la superficie, asumiendo que todos los flujos actúan de forma vertical. De esta forma, las contribuciones al flujo de calor latente total se pueden escribir como:

$$LE_c = R_{nc} - H_c \quad (10a)$$

$$LE_s = R_{ns} - H_s - \frac{G}{(1 - P_v)} \quad (10b)$$

Finalmente, G se puede estimar como una fracción (C_G) de la contribución del suelo a la radiación neta (Choudhury et al. 1987):

$$G = C_G (1 - P_v) R_{ns} \quad (11)$$

Este esquema es similar a los llamados modelos de parches en cuanto a que se ponderan los elementos del suelo y de la vegetación, y no se permite acoplamiento directo entre ambos componentes. Además el esquema que el modelo STSEB emplea para calcular la radiación neta no tiene en cuenta la atenuación de la radiación solar descendente ni de la emisión procedente del suelo a través de la vegetación.

Debido a que T_s y T_c se pueden estimar a priori a partir de medidas direccionales de T_R , o directamente a través de medidas adecuadas de los componentes por separado, se puede resolver el sistema de ecuaciones del modelo STSEB sin necesidad de recurrir a la ecuación de Priestley-Taylor para proporcionar una estimación inicial de LE_c .

ZONA DE ESTUDIO Y MEDIDAS

Este trabajo se basa en los datos registrados sobre un cultivo de maíz asociado al programa Optimizing Production Inputs for Economic and Environmental Enhancement (OPE3), situado en el USDA-ARS Beltsville Agricultural Research Center, Beltsville, Maryland ($39^\circ 01' 00'' N$, $76^\circ 52' 00'' W$, 40 m sobre el nivel del mar) en Estados Unidos. En este artículo nos hemos centrado en la campaña experimental que se llevó a cabo en el verano de 2004, cubriendo todas las etapas del crecimiento del cultivo del maíz, desde principios de junio (nacimiento de la planta) hasta finales de julio (formación de las mazorcas). El maíz se plantó el día 18 de mayo en hileras (orientación N-S) guardando un espaciado de 76 cm entre ellas.

Comenzando el 9 de junio, se tomaron medidas simultáneas de las temperaturas radiométricas del suelo y de la vegetación, empleando radiómetros de infrarrojo del tipo Apogee IRTS-P3. Estos radiómetros poseen una banda ancha (7-14 μm) con una precisión de $\pm 0,3^\circ C$, y un campo de visión de 37° . La temperatura del suelo se midió con uno de los radiómetros Apogee montado en el centro de una hilera con una vista paralela a dichas hileras. La temperatura de la vegetación se midió con otro Apogee apuntando directamente a las plantas y con una orientación de nuevo paralela a las hileras (Fig. 2a). Ambos componentes de la temperatura se midieron

en dos puntos separados dentro del campo de maíz, empleando dos pares de radiómetros. Al mismo tiempo, la temperatura efectiva del sistema suelo+maíz se midió con un quinto radiómetro Apogee colocado en una torre a una altura de 4,5 m, apuntando a la superficie con un ángulo de aproximadamente 45° y un ángulo acimutal perpendicular a la dirección de las hileras. En esta misma torre se colocó toda la instrumentación micrometeorológica necesaria (Fig. 2b).



(a)



(b)

Figura 2. (a) Montaje experimental de dos radiómetros de infrarrojos Apogee IRTS-P3. (b) Vista general de la zona de estudio y de la torre sobre la que se montó la instrumentación micrometeorológica.

La radiación neta se midió con un radiómetro Kipp & Zonen CNR-1 colocado a una altura de 4,5 m sobre el nivel del suelo. Este sensor mide por separado la radiación incidente y la saliente de onda corta y onda larga. También se utilizaron seis sensores de medida de flujo de calor en el suelo REBS (HTF-1). Estos sensores se enterraron a una profundidad de 8 cm. Además, la temperatura del suelo se midió a 2 y 6 cm de profundidad con el fin de estimar el almacenamiento de flujo de calor en el suelo por encima de los sensores HTF-1. Para la medida de los flujos de momento, calor sensible, calor latente y carbono, así como de la velocidad y dirección del viento, se

empleó un anemómetro sónico Campbell Scientific 3D. Para medir la temperatura del aire y la presión de vapor se hizo uso de un sensor CSI HMP 45C, situado a 4 m de altura. La frecuencia de muestreo era de 10 Hz para el anemómetro sónico y de 10 s para el balance de energía y la instrumentación meteorológica. Todos los datos se almacenaron como valores medios cada 30 minutos, empleando dataloggers Campbell CR5000.

La geometría de las plantas y el LAI se muestrearon periódicamente a lo largo del desarrollo del maíz. Las estimaciones del LAI se hicieron mediante un LiCor LAI 2000.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Medidas radiométricas

El primer paso fue corregir todas las medidas de los radiómetros Apogee de los efectos atmosféricos y de emisividad, empleando la ecuación de transferencia radiativa adaptada a las medidas de superficie. Para estimar la radiancia solar descendente, necesaria en la corrección atmosférica, se recurrió a perfiles atmosféricos extraídos de radiosondeos lanzados en un área cercana a la zona de estudio. Estos perfiles atmosféricos se introdujeron en el modelo de transferencia radiativa MODTRAN 4. En cuanto a los valores de emisividad se usaron $\epsilon_c=0,985\pm0,011$ and $\epsilon_s=0,960\pm0,013$ para estimar T_c y T_s , respectivamente (Rubio et al. 2003). Con el fin de obtener valores de T_c y T_s que fueran más representativos de la totalidad del campo del cultivo, se emplearon los valores medios de las temperaturas que se midieron en los dos puntos separados. La T_R estimada a partir de las medidas de T_c y T_s se comparó con las observaciones directas desde la torre, obteniéndose un error de $\pm 1,4$ °C y una sobreestimación de $+0,02$ °C. Estos resultados corroboran la validez de utilizar las componentes de la temperatura para estimar los flujos con el modelo STSEB.

Validación del modelo STSEB

Se emplearon aproximadamente unas 1700 observaciones para aplicar y evaluar el modelo STSEB, sin ninguna exclusión relacionada con la hora del día o las condiciones del cielo. Sin embargo, las estadísticas de los flujos durante el día son más descriptivas de la utilidad general del modelo, y por tanto, en este artículo nos centraremos solamente en estos flujos

diurnos para la discusión (800 observaciones aproximadamente).

Para obtener la radiación neta, se emplearon las ecuaciones (7), (8a) y (8b) con los valores característicos de un cultivo de maíz: $\alpha_s=0,12$, $\alpha_c=0,20$, $\varepsilon_s=0,960$, y $\varepsilon_c=0,985$ (Campbell and Norman, 1998). El modelo reproduce las medidas de radiación neta con buena precisión, obteniéndose una sobreestimación de $+8 \text{ W m}^{-2}$, y un error cuadrático medio (RMSD) de $\pm 18 \text{ W m}^{-2}$ (Fig 3a). Para la estimación del flujo de calor en el suelo se utilizó un valor de $C_G=0,35$ en la ecuación (11). Este valor corresponde al valor intermedio entre los límites de este parámetro (Choudhury et al., 1987). Los resultados de flujo de calor en el suelo sobreestiman las medidas en 17 W m^{-2} , con un error de $\text{RMSD}=\pm 40 \text{ W m}^{-2}$ (Fig. 3b).

La tabla 1 recoge los valores estadísticos de la comparación entre los flujos estimados de H y LE con

los medidos en su forma original (EC), y corregidos para cerrar el balance energético mediante las técnicas de los residuos (RE) y de razón de Bowen (BR) (Twine et al. 2000). La técnica de los residuos, empleando H_{EC} y asignando todo el error a LE (LE_{RE}), muestra el mejor acuerdo entre los resultados del modelo STSEB y los valores de los flujos medidos.

Las comparaciones del modelo con H_{EC} y LE_{RE} se muestran en las figuras 3c-d. Los resultados de H muestran una desviación de -3 W m^{-2} , y un RMSD de $\pm 22 \text{ W m}^{-2}$ (Fig. 3c). La pendiente (a) de la regresión lineal entre los resultados del modelo y H_{EC} es 0,86, lo cual indica que la desviación es multiplicativa.

En cuanto a LE , hay una tendencia a sobreestimar los valores observados de flujo de calor latente, LE_{EC} con una pendiente de 1,04 y un $\text{RMSD}=\pm 60 \text{ W m}^{-2}$. La sobreestimación que se observa en los re-

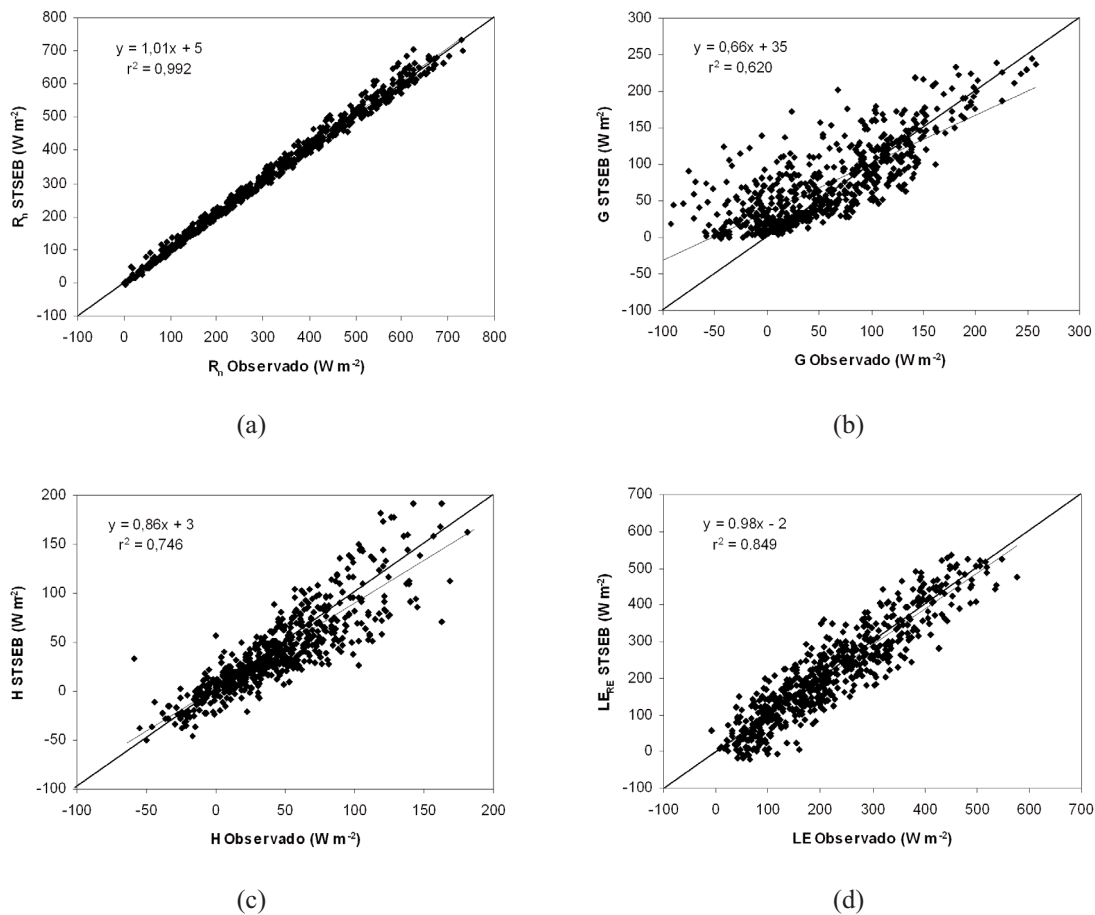


Figura 3. Regresiones lineales entre los flujos de energía en superficie estimados a través del modelo STSEB, y sus correspondientes valores observados: (a) R_n , (b) G , (c) H (medidas de eddy-covariance), (d) LE (aplicando la técnica de los residuos).

sultados de LE puede ser debida a problemas de subestimación del sistema de *eddy-covariance*. El acuerdo de los resultados de LE mejora significativamente cuando se aplica la técnica de los residuos a los valores observados. De esta forma la pendiente decrece a 0,98 y el RMSD a $\pm 50 \text{ W m}^{-2}$ (ver Fig. 3d y Tabla 1).

Comparación con el modelo TSEB

Para comprobar el impacto del esquema en paralelo usado en el modelo STSEB, en comparación con la configuración de capas del modelo TSEB, también se aplicó el modelo TSEB a la misma base de datos del cultivo del maíz. En primer lugar, se reestructuró el modelo TSEB para operar de forma similar al STSEB, empleando valores de temperatura del suelo y de la vegetación, y de esta forma eliminando la necesidad de recurrir a la aproximación de Priestley-Taylor para una estimación inicial de la transpiración de la vegetación.

La tabla 2 recoge los resultados estadísticos de la comparación de esta versión del TSEB (TSEB_comp) con los valores de los flujos observados (corregidos a través del método de los residuos). En general, se observa un buen acuerdo entre los resultados de los modelos STSEB y TSEB_comp, así como de ambos con los flujos medidos (comparar tablas 1 y 2). El esquema simple en paralelo para la radiación neta contenido en el modelo STSEB fun-

ciona casi tan bien como la representación más detallada de dos capas del modelo TSEB_comp. Por tanto, el esquema en paralelo presentado parece ser apropiado bajo las condiciones analizadas en este estudio.

Conviene también indicar aquí que la principal limitación del modelo STSEB es que se necesita información fiable de las temperaturas del suelo y de la vegetación. La separación de estas dos componentes a partir de medidas biangulares de la temperatura efectiva de la superficie no es una tarea sencilla (François, 2002), y la precisión que se obtiene en medidas desde satélite puede ser un factor limitante. Varios autores han realizado estudios en esta línea, observando errores que oscilan entre 1-2 °C en las temperaturas del suelo y de la vegetación obtenidas a partir de medidas direccionales de la temperatura del conjunto realizadas, por ejemplo, desde el sensor AATSR a bordo del satélite ENVISAT.

Análisis de sensibilidad del modelo STSEB

Para la aplicación operativa a escala regional, empleando variables y parámetros de entrada obtenidos desde satélite y datos meteorológicos no locales, las incertidumbres típicas en los datos de entrada del modelo STSEB pueden conducir a errores importantes en los flujos estimados. Con el fin de comprobar el impacto de dichos errores típicos, se ha realizado un análisis de sensibilidad del modelo STSEB de

Flujo	Bias (W m^{-2})	RMSD (W m^{-2})	MAD (W m^{-2})	a	b (W m^{-2})	r^2
R_n	8	18	13	1,01	5	0,992
G	17	40	30	0,66	35	0,620
H_{EC}	-3	22	16	0,86	3	0,746
H_{BR}	-10	26	19	0,76	2	0,738
LE_{EC}	30	60	50	1,04	22	0,820
LE_{RE}	-6	50	40	0,98	-2	0,849
LE_{BR}	0	50	40	1,00	0,6	0,854

Tabla 1. Análisis estadístico del funcionamiento del modelo STSEB con los datos diurnos de la base de datos OPE3-2004 (RMSD es el error cuadrático medio y MAD es la media de las diferencias absolutas).

Flujo	Bias (W m^{-2})	RMSD (W m^{-2})	MAD (W m^{-2})	a	b (W m^{-2})	r^2
R_n	-2	11	8	0,97	8	0,997
G	17	40	30	0,67	35	0,713
H_{EC}	-13	25	19	0,73	-1,7	0,737
LE_{RE}	-5	40	30	0,93	9	0,879

Tabla 2. Análisis estadístico del funcionamiento del modelo TSEB_comp con los datos diurnos de la base de datos OPE3-2004.

acuerdo con el método sugerido por Zhan et al. (1996). La sensibilidad relativa, S_p , de un flujo estimado, Z , a una incertidumbre X en un parámetro p , se puede expresar como:

$$S_p(X) = \left| \frac{Z_- - Z_+}{Z_0} \right| \quad (12)$$

donde Z_0 , Z_+ , y Z_- son los flujos (H , R_n , o LE) obtenidos cuando p toma su valor de referencia, p_0 , cuando p se incrementa una cantidad X su valor de referencia, y cuando p disminuye en X su valor de referencia, respectivamente, manteniendo fijos todos el resto de parámetros de entrada.

En este análisis, todos los datos horarios se usaron como conjunto de valores de referencia. Por tanto, se consideró un amplio intervalo de valores de entrada. Para cada variable de entrada, se realizó una simulación de toda la serie horaria empleando valores perturbados de esa variable, y se extrajo la media de S_p para la serie temporal entera.

La tabla 3 muestra una lista de todas las variables y parámetros de entrada necesarios en el modelo STSEB, así como las incertidumbres asignadas a cada uno de ellos. Los valores estimados de sensibilidad, S_p , pueden resultar artificialmente altos en el caso de H para algunos de los parámetros debido a los bajos valores del flujo de referencia, o también al hecho de que las distintas variables de entrada no son independientes y por tanto no todos los escenarios considerados en el análisis pueden corresponder a la realidad. En el análisis también se consideraron la sensibilidad de R_n y LE a los errores de entrada. En la tabla 3 se muestran los valores medios de S_p para la duración completa del experimento y para los tres flujos. Los valores mayores del 10% aparecen en negrita para indicar los parámetros que poseen un efecto significativo en la estimación de los flujos. Los errores en las temperaturas del suelo, de la vegetación, y del aire muestran claramente el

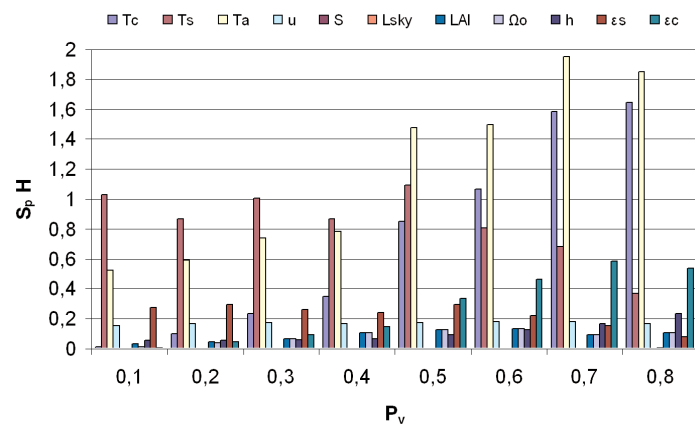
mayor impacto en el flujo de calor sensible modelado. Las incertidumbres en otros parámetros como las emisividades del suelo y de la vegetación, la altura de la vegetación, o la velocidad del viento también tienen un efecto importante en H . En cuanto a R_n , la radiación incidente de onda corta y onda larga son los parámetros de entrada claves que conducen a valores de sensibilidad mayores al 10%. Estos valores de radiación, junto con las temperaturas del suelo, de la vegetación y del aire, tienen el mayor efecto en la estimación de LE . Para LE , todos los parámetros de entrada presentan valores de S_p inferiores al 25% en término medio.

La figura 4 muestra las variaciones de la sensibilidad del modelo con la condición de fracción de cubierta vegetal. Los datos de S_p se agruparon en 8 intervalos de anchura 0,1 en P_v , abarcando un intervalo total desde 0,1 hasta 0,8. Los valores de sensibilidad relativa se promediaron para cada uno de los intervalos de P_v . Las figuras 4a - 4c muestran los resultados para H , R_n , y LE , respectivamente. Los parámetros de entrada con valores de S_p inferiores a 10^{-3} no se han incluido en las gráficas. Para variables y parámetros de entrada relacionados con el suelo (T_s , α_s , y ε_s), S_p decrece a medida que P_v aumenta, mientras que para aquellos relacionados directamente con la vegetación, como T_c , α_c , y ε_c , se observa un incremento en S_p . En cuanto a las variables relacionadas con la estructura de la vegetación, como el LAI, la altura del cultivo o el *clumping factor*, la sensibilidad relativa también aumenta con la P_v .

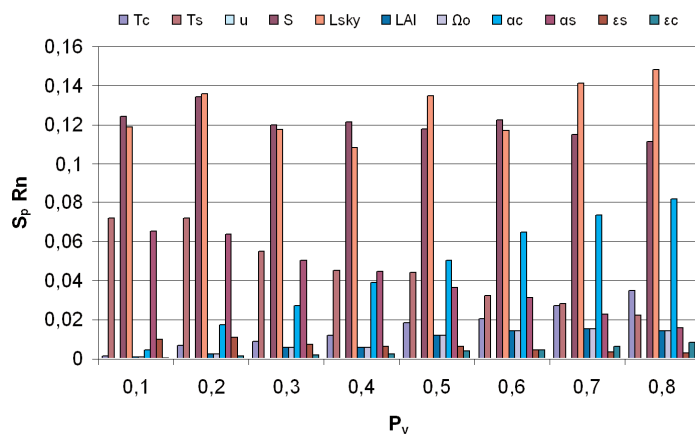
Para las estimaciones del flujo de calor latente en condiciones de baja cobertura de vegetación ($P_v < 0,2$), el modelo STSEB es más sensible a incertidumbres en T_s , y bajo condiciones de alta cobertura ($P_v > 0,6$) lo es a incertidumbres en T_c y T_a (Fig. 4c). La sensibilidad del modelo STSEB a cualquiera de las incertidumbres asumidas en las variables y parámetros de entrada para la estimación

Entrada	T_c (°C)	T_s (°C)	T_a (°C)	u (m s ⁻¹)	S (W m ⁻²)	L_{sky} (W m ⁻²)	LAI	Ω_0	h (m)	α_c	α_s	ε_c	ε_s
X	1 °C	2 °C	1 °C	10%	5%	5%	20%	20%	10%	20%	20%	0,02	0,02
H	0,66	0,86	1,10	0,17	0,0018	0,0018	0,08	0,07	0,10	<10 ⁻³	<10 ⁻³	0,24	0,23
R_n	0,015	0,05	0	0	0,12	0,13	0,008	0,008	0	0,04	0,04	0,003	0,007
LE	0,10	0,23	0,17	0,04	0,14	0,15	0,03	0,03	0,018	0,05	0,05	0,04	0,05

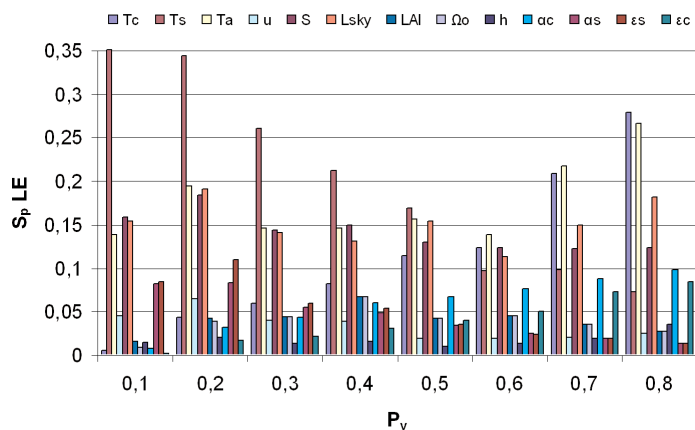
Tabla 3. Valores medios de la sensibilidad relativa, S_p , del modelo STSEB a las incertidumbres, X , en las variables y parámetros de entrada necesarios para estimar H , R_n , y LE .



(a)



(b)



(c)

Figura 4. Evolución de la sensibilidad relativa del modelo STSEB a los distintos parámetros y variables de entrada, S_p , con la proporción de vegetación, P_v , para: (a) H , (b) R_n , (c) LE .

de LE es inferior al 35% para el intervalo completo de P_v . La sensibilidad es incluso menor en el intervalo de coberturas de vegetación $0,3 < P_v < 0,6$, dentro del cual los valores de S_p resultan inferiores al 20%. Las simulaciones de estimación de temperaturas del suelo y de la vegetación, realizadas por François et al. (2002), a partir de medidas direccionales de temperatura radiativa, cubriendo un amplio intervalo de coberturas de vegetación y condiciones de humedad, mostraron que el error en la obtención de T_s se incrementaba a medida que aumentaba el LAI, mientras que el error en la estimación T_c decrecía generalmente. Teniendo en cuenta este comportamiento, las incertidumbres obtenidas en la estimación de los flujos podrían verse reducidas.

CONCLUSIONES

Se ha propuesto un modelo simplificado de balance de energía de dos fuentes (STSEB) para estimar flujos de calor en superficie sobre zonas de vegetación dispersa, a partir de las temperaturas radiométricas del suelo y de la vegetación. La ventaja del esquema de este modelo es que se trata de una versión simplificada del tradicional modelo TSEB, en concreto en la forma de partir la radiación neta entre el suelo y la vegetación. Por otro lado, el modelo STSEB necesita como entrada las medidas de las temperaturas del suelo y de la vegetación, mientras que el TSEB realiza una descomposición interna de la temperatura radiométrica efectiva. Se ha aplicado el modelo STSEB a un amplio intervalo de condiciones de cobertura de vegetación haciendo uso de datos de campo tomados en un campo de maíz perteneciente al USDA-ARS en Beltsville (Maryland, USA).

Se midieron por separado las temperaturas del suelo y de la vegetación. Se ha evaluado la fiabilidad y representatividad de estas componentes a la hora de ser utilizadas como parámetros de entrada en el modelo STSEB, comparando la temperatura efectiva estimada a través de dichas componentes con los valores de la temperatura radiométrica efectiva de la superficie medidos directamente desde una torre. Comparando ambas temperaturas se obtiene un error de $RMSD = \pm 1,4$ °C.

Se ha validado el modelo STSEB empleando medidas diurnas de flujos de energía en superficie. Se han obtenido errores entre ± 15 y ± 50 $W m^{-2}$ para R_n , G , H , y LE después de forzar el cierre del balance energético. Se ha obtenido un acuerdo razonable entre el modelo STSEB y una versión del tradicional modelo TSEB, preparado para trabajar con compo-

nentes de temperatura.

Se ha explorado la capacidad operativa del modelo STSEB a través de un análisis de la sensibilidad de los resultados del modelo a incertidumbres en los parámetros y variables de entrada. Los datos de temperatura, T_c , T_s , y T_a presentan el mayor impacto en la estimación de los flujos. Bajo las condiciones de este estudio, gran parte de la energía disponible se convertía en flujo de calor latente, LE . A consecuencia de este hecho, la sensibilidad del modelo en las salidas de H a incertidumbres en las temperaturas del aire, del suelo o de la vegetación a menudo sobrepasaba el 100% de su valor de referencia. Por otro lado, la sensibilidad del modelo en las salidas de LE a estas incertidumbres en las temperaturas fueron generalmente inferiores al 30%. Además, no eran función de la cobertura de vegetación en el intervalo $0,1 < P_v < 0,8$.

En resumen, estos resultados muestran la utilidad del modelo STSEB para un cultivo de maíz bajo un amplio intervalo de condiciones de cobertura, cuando se dispone de medidas fiables de las temperaturas del suelo y de la vegetación. Sin embargo, más trabajo es necesario para evaluar el modelo en otros ecosistemas y bajo condiciones ambientales diferentes.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (Proyectos CGL2004-06099-C03-01 y CGL2007-64666/CLI, cofinanciados con fondos FEDER de la Unión Europea, y Acciones Complementarias CGL2005-24207-E/CLI y CGL2006-27067-E/CLI), y la Universidad de Valencia (beca de investigación V Segles de J. M. Sánchez). Los autores quieren agradecer el apoyo en el mantenimiento de la zona experimental OPE3, así como la recogida y almacenamiento de los datos de los Drs. William P. Kustas, Martha C. Anderson, Craig Daughtry, Timothy Gish, Greg McCarty, y Mr. Andrew Russ del USDA-ARS Hydrology and Remote Sensing Laboratory, y del Dr. John Prueger del USDA-ARS Soil Tilth Lab en Ames, Iowa. Durante su estancia en el USDA-ARS Hydrology and Remote Sensing Lab, J. M. Sánchez recibió financiación por parte del propio centro.

REFERENCIAS

ANDERSON, M.C., NORMAN, J.M., KUSTAS,

- W.P., LI, F., PRUEGER, J.H., and MECIKALSKI, J.R. 2005. Effects of vegetation clumping on two-source model predictions of surface energy fluxes from an agricultural landscape during SMACEX. *Journal of Hydrometeorology*, 6, 892-909.
- BLYTH, E. M., and HARDING, R. J. 1995. Application of aggregation models to surface heat flux from the Sahelian tiger bush. *Agricultural and Forest Meteorology*, 72, 213-235.
- CAMPBELL, G. S., and NORMAN, J. M. 1998. *An introduction to Environmental Biophysics*, Springer, New York, 286 pp.
- CHOUDHURY, B. J., IDSO, S. B., and REGINATO, R. J. 1987. Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an infrared-temperature based energy balance equation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 39, 283-297.
- FRANÇOIS, C. 2002. The potential of directional radiometric temperatures for monitoring soil and leaf temperature and soil moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 80, 122-133.
- NORMAN, J. M., KUSTAS, W., & HUMES, K. 1995. A two-source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes from observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77: 263-293.
- RUBIO, E., CASELLES, V., COLL, C., VALOR, E., and SOSPEDRA, F. 2003. Thermal infrared emissivities of natural surfaces: improvements on the experimental set-up and new measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 20 (24), 5379-5390.
- SÁNCHEZ, J. M., KUSTAS, W. P., CASELLES, V., and ANDERSON, M. C., 2007. Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations. *Remote Sensing of Environment*, 112 (3), 1130-1143.
- SHUTTLEWORTH, W., & WALLACE, J. 1985. Evaporation from sparse crops: an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111, 1143-1162.
- TWINE, T. E., KUSTAS, W. P., NORMAN, J. M., COOK, D. R., HOUSER, P.R., MEYERS, T. P., PRUEGER, J. H., STARKS, P. J., and WESELY, M. L. 2000. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103 (3), 279-300.
- ZHAN, X., KUSTAS, W. P., and HUMES, K. S. 1996. An intercomparison study on models of sensible heat flux over partial canopy surfaces with remotely sensed surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 58, 242-256.