

COMPORTAMIENTO DEL BALANCE DE ENERGÍA EN UN CULTIVO DE *Avena sativa* L.

Raúl Rivas^{1,2}, Dora Ocampo^{1,2}

¹Instituto de Hidrología de Llanuras, Pinto 399, B7000GHG, Tandil. Buenos Aires – Argentina

²Comisión de Investigaciones Científicas de Buenos Aires – CIC

Correo electrónico: rrivas@rec.unicen.edu.ar, www.ihlla.org.ar

Palabras clave: Balance de energía, transpiración, *Avena sativa* L.

RESUMEN. *Se analiza el comportamiento de los términos de la ecuación de balance de energía (BE) en un cultivo de Avena sativa L., en el centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina. A partir de medidas locales de radiación de onda corta y larga (entrante y saliente a la superficie), flujo de calor en el suelo, velocidad de viento, humedad de suelo a 10 y 20 cm de profundidad y precipitación, se realizan BE diarios para situaciones de máxima y mínima humedad en los primeros 20 cm de suelo. Los resultados muestran que en situación de mínima humedad, la energía se reparte de diferente forma en los términos del BE y en los momentos de máxima humedad de suelo, la mayor proporción de la radiación neta es empleada en los flujos de transferencia de calor.*

ABSTRACT. *The behavior of the terms of the energy balance equation (BE) is analyzed in a crop of Avena sativa L. in the center of the province of Buenos Aires, Argentina. Beginning of local short-wave radiation and long (downward and upward to the surface), heat flux in the soil, wind speed, soil moisture at 10 and 20 cm depth and precipitation, realized been BE are situations daily maximum and minimum moisture in the first 20 cm of soil. The results show that at least moisture, the energy is distributed differently in terms of BE, and at times of maximum soil moisture, the higher proportion of the net radiation is used in the flow of heat transfer.*

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la ecuación de balance de energía (BE) de la superficie permite comprender los flujos de masa y energía en cualquier sistema físico y biológico (Monteith y Unsworth, 1990). A partir de ésta se conoce la forma en que se distribuye la radiación neta (Rn), entre el flujo de calor latente (LE), el flujo de calor sensible (H) y el flujo de calor en el suelo (G). La Rn constituye la energía disponible para el desarrollo de los procesos a nivel de superficie (Brutsaert, 1984) y es la variable de entrada que modela el sistema suelo-planta-atmósfera. El LE comprende la energía empleada en el proceso de Evapotranspiración y es considerado punto de partida de numerosos procesos físicos que tienen lugar en la atmósfera (Sánchez Tomás, 2005). En cuanto al H, este corresponde a la energía empleada en la variación de la temperatura entre la superficie observada y el aire. Y por último, el flujo de calor en el suelo (G), que corresponde a la energía empleada para la conducción del calor en el suelo. En este sentido, la incumbencia de cada uno de los términos en el análisis de la ecuación de BE y un conocimiento general del mismo, es esencial en estudios de carácter científico-tecnológico, en la planificación y gestión de los recursos naturales: agua y vegetación, en estudios del clima, entre otras aplicaciones. En el presente trabajo se analiza el comportamiento de los términos que comprenden el BE, donde el LE representa la energía empleada en el proceso de transpiración desde la vegetación, es decir, el movimiento vertical del agua hacia la atmósfera desde las raíces, tallos y hojas de las plantas (Rivas, 2004), y donde el comportamiento del resto de los términos determina como se ha distribuido la energía no utilizada en el proceso de transferencia de calor latente. En este marco, el objetivo del trabajo es evaluar el comportamiento de los términos del BE en una parcela experimental cubierta con una pastura de invierno (*Avena sativa* L) y realizar BE diarios para situaciones de máxima y mínima humedad en los primeros 20 cm de suelo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

A partir de datos locales obtenidos de estaciones meteorológicas es posible conocer el BE de un sistema. En el presente estudio, las medidas locales se han realizado a partir de dos estaciones, una estación de BE situada sobre una parcela cultivada con avena y la otra ubicada en un predio delimitado en la misma parcela (Figura 1). Ambas estaciones toman las lecturas de los datos cada 15 minutos, y se encuentran instaladas en el campus de Tandil de la Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires (37.32° S, 59.08° W, altitud 214 m), al sur de la capital Argentina.

La primera está compuesta por un sensor Campbell Scientific CNR1, un sensor de flujo de calor en el suelo (G) Campbell Scientific HFT3, un sensor de velocidad de viento y un sensor de humedad de suelo (Hs) a 10 cm de profundidad. El sensor CNR1 discrimina la radiación de onda corta ($0,305 - 2,800 \mu\text{m}$) entrante ($R_{s\downarrow}$) y saliente ($R_{s\uparrow}$) y de onda larga ($5-50 \mu\text{m}$) entrante ($R_{l\downarrow}$) y saliente ($R_{l\uparrow}$) a la cubierta vegetal. El G es medido por el sensor HFT3 instalado a 7 cm de profundidad (Figura 1). La otra estación se compone de un conjunto de sensores conectados a un logger de 8 canales y de un pluviógrafo. Se destaca la presencia de un sensor Decagon Devices ECH20 modelo EC-10 y EC-20, que registra medidas en milivoltios (mV) de la Hs a 10 y 20 cm de profundidad. Luego, a partir de ecuaciones específicas para el suelo, se convierten los mV a contenido volumétrico de agua (en %). Estos datos complementaron los registros obtenidos por la estación de BE.

El período de estudio abarcó desde la etapa de desarrollo de la avena, con cobertura efectiva completa hasta el comienzo de la madurez de la misma (siguiendo la clasificación de Allen et al. 1998). Este cultivo, de primavera y de invierno, es considerado de estación fría debido a que las mayores áreas de producción del mismo se localizan en los climas templados-fríos. Por esta razón se ha convertido en un forraje de importancia debido a que abastece de alimento en la época de mayor escasez.

La especie pertenece a la familia de las poáceas y es utilizada como alimento y como forraje para los animales. Es muy exigente en agua y por ello se adapta perfectamente a zonas de clima templado-frío y húmedo (Según la revisión sobre el cultivo, propuesta en el año 2004 por FAO). Su sistema radicular es el más extenso de todos los cereales y depende de varios factores: características del suelo, altura del nivel freático y precipitaciones durante la etapa de desarrollo, entre otras características. En consecuencia, las raíces pueden alcanzar hasta 1 m de profundidad, concentrándose su distribución en los primeros 25-30 cm. El suelo de la parcela constituye un arguidol típico, profundo, rico en materia orgánica y minerales (arcillas). En la Figura 1 se observa el perfil del mismo con sus respectivos horizontes, desde Ap1 al C. En los primeros 25 cm se encuentran los horizontes con aptitud agrícola.

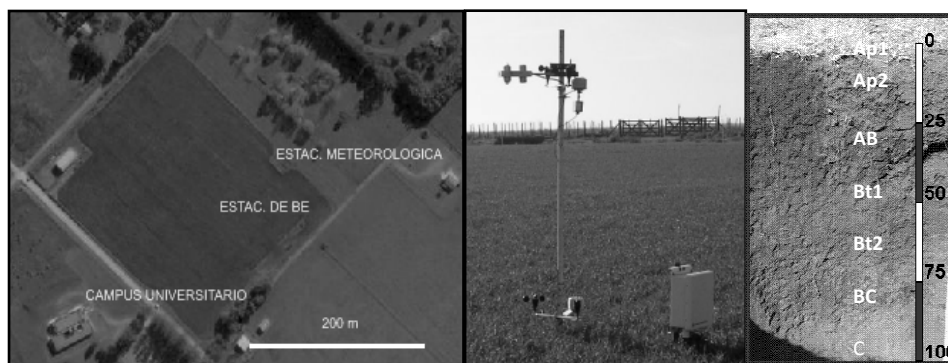


Figura 1. Ubicación de las estaciones meteorológicas en la parcela experimental; imagen de la estación de balance de energía (BE); y perfil del suelo *Arguidol típico* (escala en cm).

La siembra del cultivo se efectuó durante el mes de marzo de 2008. Días después se instala la estación de BE, cuando la avena cubría totalmente la superficie del suelo (etapa de desarrollo). A partir de la información disponible en las estaciones, se trabajaron datos del período comprendido entre los días 24 de abril y 22 de junio de 2008 (115 a 174 días julianos respectivamente). De ese total, el 23 % de los días (16) corresponde a días sin cobertura nubosa. En cuanto a las precipitaciones (P) medias anuales para el área de estudio, estas se aproximan a los 900 mm (según datos de la serie histórica 1973-2008, perteneciente a la estación Tandil Aerodromo). Para el periodo de análisis, las precipitaciones medias mensuales de los meses de abril, mayo y junio corresponden a 69; 63 y 35 mm respectivamente; contrariamente en la estación del campus se registraron 70 mm en el período, específicamente 0; 47 y 23 mm para cada mes en cuestión. Es decir, la P del período representa menos del 50 % de la P media. El total de las P se concentraron entre los días julianos 139 a 174.

2.2 La ecuación de balance de energía

El BE en la superficie describe la forma en que se distribuye la R_n , es decir, la energía disponible para el desarrollo de los procesos a nivel de superficie. La ecuación simplificada que conceptualiza el BE es la siguiente expresión (Brutsaert, 1984; Rivas y Caselles, 2004):

$$R_n + G + LE + H = 0 \quad (1)$$

donde R_n corresponde a la radiación neta, G al flujo de calor en el suelo, LE al flujo de calor latente y H al flujo de calor sensible. La unidad de trabajo es $W m^{-2}$.

Esta ecuación se sustenta bajo la hipótesis de no existir advección y despreciando la energía de fotosíntesis y otros procesos, por lo tanto, solo es aplicable a zonas extensas de vegetación homogénea. En ella se asume el modelo de una capa, donde se considera que la estructura de la vegetación a estudiar es única, sus características permanecen constantes en toda su extensión y todos los intercambios se dan entre esta y la atmósfera (Sánchez Tomás, 2005).

Para obtener las curvas de comportamiento diario de BE, se aplicó la ecuación 1. El valor del G corresponde a las medidas obtenidas por el sensor HFT3 y la R_n se ha estimado a partir de los datos de la CNR1 según la siguiente Ecuación (Rivas y Caselles, 2003):

$$R_n = (R_{ns} - R_{nl}) \quad (2)$$

De la cual se desprenden las Ecuaciones 3 y 4 (Rivas et al. 2008):

$$R_{ns} = (Rs_{\downarrow} - Rs_{\uparrow}) \quad (3)$$

$$R_{nl} = (Rl_{\downarrow} - Rl_{\uparrow}) \quad (4)$$

donde R_n es la radiación neta, R_{ns} es la radiación neta de onda corta, Rs_{\downarrow} es la radiación de onda corta entrante, Rs_{\uparrow} es la radiación de onda corta saliente, R_{nl} es la radiación neta de onda larga, Rl_{\downarrow} es la radiación de onda larga entrante y Rl_{\uparrow} es la radiación de onda larga saliente. Los valores de Rl_{\downarrow} y Rl_{\uparrow} han sido corregidos de los efectos debidos a la temperatura interna del sensor.

La estimación del H y del LE generalmente es más complicada. La bibliografía muestra que una forma de determinar LE es como residuo de la ecuación simplificada del BE (Ecuación 1), mientras que el cálculo del H es más complejo y difícil. Generalmente, su estimación puede ser lograda a partir de ecuaciones y modelos determinados (Kustas et al. 2003; Rivas y Caselles, 2004; Wang et al. 2006). En este trabajo la metodología propuesta para estimar el H, considera la relación existente entre los flujos energéticos instantáneos y diarios. De esta relación se desprende la Ecuación 5 que permite el cálculo de H (Wassenaar et al. 2002; Sánchez Tomás, 2005):

$$\frac{H_d}{R_{nd}} = \frac{H_i}{R_{mi}} \quad (5)$$

donde d indica el valor diario, i el valor instantáneo

Paralelamente, se ha determinado la Fracción Evaporativa del Suelo (FE), a partir de la medida de humedad en los primeros 20 cm. La estimación de este factor permite conocer el agua disponible en el sistema para que se produzca el proceso de LE.

$$FE = \frac{(Hs_d - Hs_{min})}{(Hs_{max} - Hs_{min})} \quad (6)$$

donde Hs_d es la humedad de suelo a escala diaria, Hs_{min} es la humedad mínima de suelo, Hs_{max} es la humedad máxima de suelo

El valor de FE ha sido utilizado como indicador de la actividad fotosintética y proporciona información cuali-cuantitativa del LE. Según un registro histórico de la estación meteorológica, los valores mínimos y máximos de Hs empleados en la Ecuación 6, corresponden a 29 y 0.03 % respectivamente.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra el comportamiento de la P, de la Hs y del viento (U_2) para el período de ensayo, según datos de las estaciones. Se observa que en la primera parte del período en estudio (115-138 días julianos) se presentan condiciones de mínima humedad de suelo, con valores inferiores al 5 %. En la segunda parte del período (139-174 días julianos), se observan condiciones distintas, debido a eventos de precipitación. Como consecuencia, se presenta un comportamiento diferente de la Hs , con valores mínimos de 20 % y valores máximos de hasta 29 %. La máxima precipitación se registró el día 139, alcanzando los 33 mm. En los días siguientes, las precipitaciones no superaron los 10 mm, sin embargo, fueron suficientes para que el sistema permaneciera en condiciones óptimas de humedad. Es importante indicar que el suelo durante el período analizado no ha alcanzado mínimos, si en cambio, valores máximos de Hs , según el registro histórico.

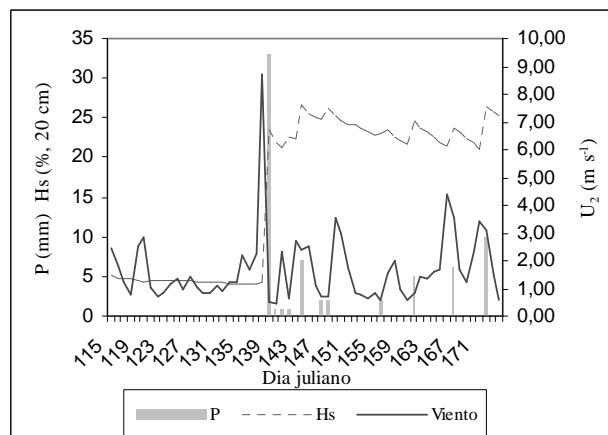


Figura 2. Comportamiento de las precipitaciones, humedad de suelo y velocidad de viento durante el período de estudio.

Las Figuras 3 a 8 representan 6 días con sus respectivos BE diarios correspondientes a días sin cobertura nubosa. En las Figuras 3, 4 y 5 se muestran BE diarios para la primera parte del período de estudio. En cada uno se muestra el comportamiento de la R_n , del LE, del G y del H. Se observa que la R_n máxima ocurre a las 13 h,

siendo los valores máximos próximos a 327 W m^{-2} . Se destaca que la mayor parte de la energía aportada por R_n es empleada en el H (93 %). Distinto sucede con el G y el LE que representan una proporción menor de la R_n . El G representa entre el 5-6 % de la R_n . En cuanto al valor medio de la transferencia de calor latente para los tres días, este es de 0.6 W m^{-2} , que convertidos a mm de agua evaporada corresponden a 0.02 mm día^{-1} , por lo tanto, el proceso de transferencia de LE es mínimo. Desde el día 133 al día 135 aumenta tanto el G y el H en proporción a la R_n , contrario a lo que ocurre con LE , que disminuye significativamente. Este aumento de H puede relacionarse a un aumento de U_2 registrado para esos días (Figura 2). El comportamiento general del sistema continúa con las mismas características hasta la ocurrencia de precipitaciones, donde a partir de ese momento las condiciones cambian significativamente.

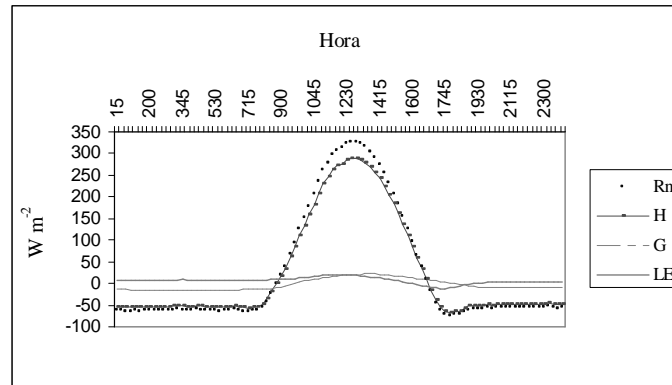


Figura 3. BE para el día juliano 133 (12 de mayo de 2008)

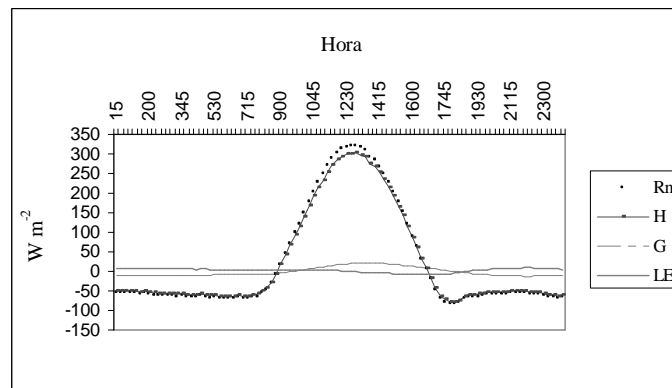


Figura 4. BE para el día juliano 134 (13 de mayo de 2008)

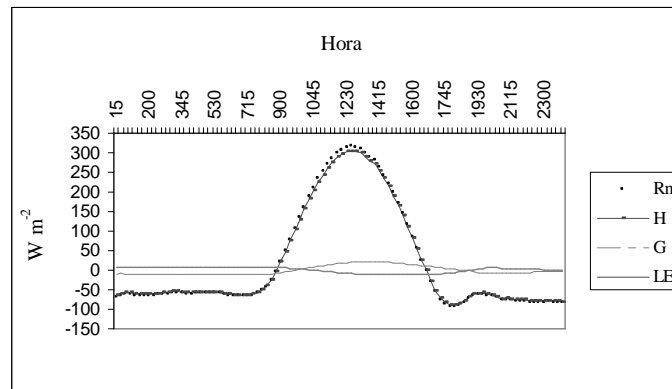


Figura 5. BE para el día juliano 135 (14 de mayo de 2008)

En las Figuras 6, 7 y 8 se presentan los BE diarios en la segunda parte del período de estudio (días 158, 164 y 165). Los valores máximos de la Rn se presentan a las 13 h y son próximos a $267 W m^{-2}$. Se observa que la energía aportada al sistema se reparte de diferente manera con respecto al periodo anterior. La Rn máxima es menor al periodo anterior, en donde la energía del sistema en buena proporción proveniente de la Rn, se utiliza en el proceso de LE (42 %), una elevada proporción en H (57 %) y una mínima cantidad en G (1 %). El aumento de LE, se vincula a la Hs presente en el sistema. El análisis de Hs muestra valores de la FE elevados (mayores a 0,80), mientras que para el período anterior, este factor era despreciable (0,006). Estas condiciones, sumadas al estado fenológico del cultivo de avena, hacen que el LE adquiera un papel de mayor importancia.

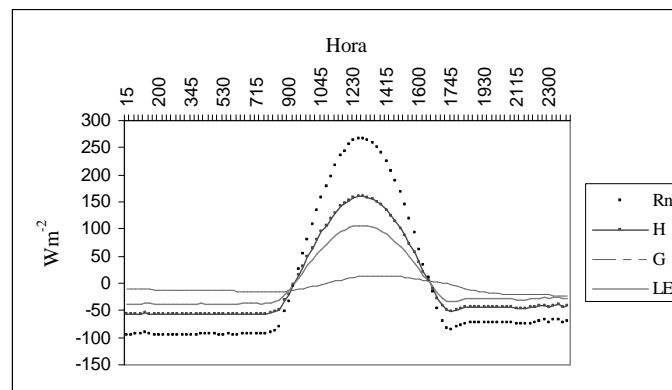


Figura 6. BE para el día juliano 158 (6 de junio de 2008)

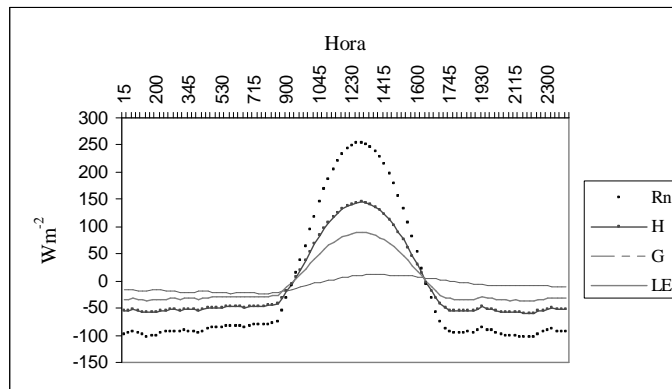


Figura 7. BE para el día juliano 164 (12 de junio de 2008)

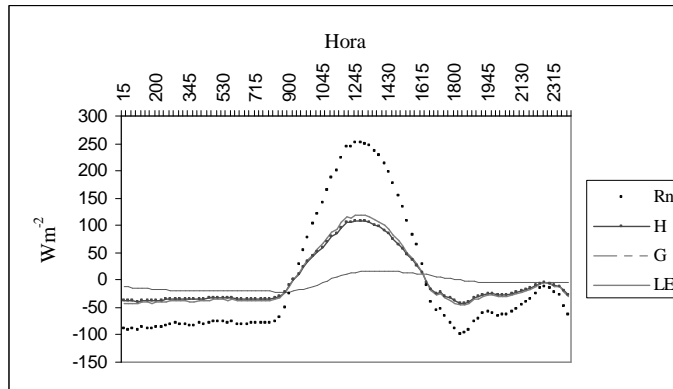


Figura 8. BE para el día juliano 165 (13 de junio de 2008)

Con respecto al G, este ha disminuido en un 39 % respecto al período anterior (Figura 9). Esta situación puede atribuirse al efecto generado por la alta proporción de vegetación, producto del estado fenológico del cultivo. En esta parte del periodo, la vegetación cubre totalmente la superficie del suelo, haciendo que la energía se utilice en mayor grado en el proceso de transferencia de calor latente y sensible, y no en calentar el suelo.

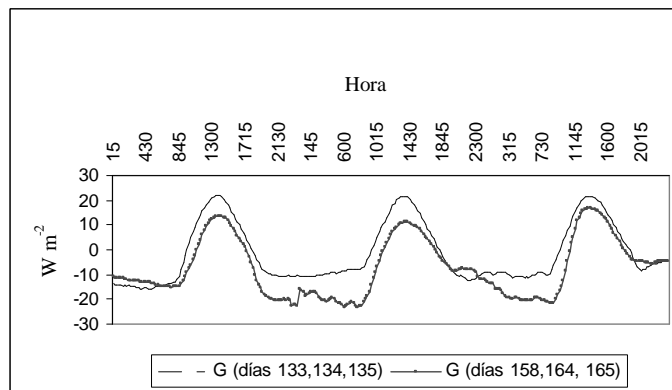


Figura 9. Comportamiento diario de G en situación de mínima y máxima Hs

4. CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo muestran la utilidad de los Balances de energía diarios en los sistemas suelo-planta-atmósfera, permitiendo principalmente conocer como se reparte la Radiación neta y como varía la proporción de esta variable empleada en el Flujo de calor sensible, el Flujo de calor latente y el Flujo de calor en el suelo. En este caso, se logra conocer el Balance energético de la *Avena sativa* L., cultivo que posee las mayores áreas de producción localizadas en los climas templados-fríos. Se ha analizado el comportamiento del Balance de energía del cultivo según la proximidad de este a dos periodos bien diferenciados: mínima y máxima disponibilidad de agua. Se ha observado que el valor del Flujo de calor latente, a partir de la ecuación de Balance de energía, sigue un comportamiento diferente. En el primer periodo, donde se presentan condiciones de mínima, la energía se reparte de diferente forma en los términos del Balance de energía, donde el Flujo de calor latente y Flujo de calor en el suelo son prácticamente despreciables en proporción a la Radiación neta. En el segundo periodo, donde se registran condiciones de máxima humedad de suelo, la mayor proporción de la Radiación neta es empleada en el Flujo de calor sensible y en el Flujo de calor latente. Para el caso específico del Flujo de calor latente, se observa su dependencia a la disponibilidad de agua en el sistema. Otro aporte del estudio es que permite detectar diferencias en el comportamiento del Flujo de calor en el suelo (considerado nulo a escala diaria en la mayor parte de los trabajos de estimación de Flujo de calor latente) atribuidas en este caso a la alta proporción de cobertura vegetal. Este estudio, además, permite entender como repercuten sobre el BE (en particular sobre el LE) las variables ambientales (como precipitación), y los factores fisiológicos (principalmente desarrollo de la vegetación).

Agradecimientos. Los autores agradecen a la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Argentina y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT PICTO 22825).

REFERENCIAS

- Allen, R.G.; L. S. Pereira; R. Dirck; and S. Martin. 1998. FAO Irrigation and Drainage. Paper N° 56. Crop Evapotranspiration.
- Brutsaert, W.1984. Evaporation into the Atmosphere. Theory, history and applications. Reidel Publishing Company. Dordrecht, Holland. 1-10, 129-133.
- Kustas, W.P.; G.R. Diak and M.S. Moran. 2003. Evapotranspiration, Remote Sensing of. Encyclopedia of Water Science pp 267 – 274. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Monteith, J.L. and M. Unsworth. 1990. Principles of Environmental Physics. Edgard Arnold, London, second edition. 71-79.
- Rivas, R. 2004. Propuesta de un Modelo operativo para la estimación de la Evapotranspiración. Tesis Doctoral. Universidad de Valencia. 13-32.
- Rivas, R. and V. Caselles. 2004. A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing based surface temperature and local meteorological data. Remote Sensing of Environment 93: 68-76.
- Rivas, R. y V. Caselles. 2003. La Ecuación de Penman- Monteith para su uso en Teledetección. Revista de Teledetección. N° 20, 65-72.
- Rivas, R; J. Schimbeck y D. Ocampo. 2008. Estimación del Flujo de Calor Latente a partir de un Modelo de una Capa en una parcela mixta. XII Reunión Argentina de Agrometeorología, 8 al 10 de octubre de 2008. San Salvador de Jujuy – Argentina.
- Sánchez Tomás, J. M. 2005. Estimación de la Evapotranspiración en Áreas de cobertura parcial: Aplicación a zonas FIFE y SIFLEX. Universitat de Valencia, Facultat de Física- Departamento de Termodinámica. 3-15.
- Suttie, J.M. and Reynolds, S. G. (Editores). 2004. Fodder oats: a world overview. Plant producción and protección. Serie N° 33. FAO
- Wang K.,Li, Z., Cribb, M. 2006. Estimation of evaporative fraction from a combination of day and night land surface temperatures and ndvi: a new method to determine the Priestley–Taylor parameter. Remote Sensing of Environment 102:293-305.
- Wassenaar, T.; Olioso, A.; Hasager, C.; Jacob, F. and Chehbouni, A. Estimation of Evapotranspiration on heterogeneous pixels. En recent Advances in Quantitative Remote Sensing, proceedings of the first International Symposium. Editor: J.A. Sobrino. 458-465.