

COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS COVARIANZA Y RELACIÓN DE BOWEN EN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE UN VIÑEDO BAJO CLIMA SEMI-ÁRIDO

VINEYARD EVAPOTRANSPIRATION MEASUREMENTS IN A SEMIARID ENVIRONMENT: EDDY COVARIANCE AND BOWEN RATIO COMPARISON

Claudio Balbontín-Nesvara*, Alfonso Calera-Belmonte, José González-Piqueras, Isidro Campos-Rodríguez, M. Llanos López-González, Enrique Torres-Prieto

Instituto de Desarrollo Regional, Grupo de Teledetección y SIG. Instituto de Desarrollo Regional, Universidad de Castilla-La Mancha. Campus Universitario s/n, 02071, Albacete, España. (claudio.balbontin@uclm.es)

RESUMEN

La comparación entre sistemas micrometeorológicos permite analizar la confiabilidad de los resultados y evaluar su ajuste a diferentes cultivos. En el presente estudio se midió la evapotranspiración (ET) de una cubierta de viña (*Vitis vinifera*) en espaldera, durante su ciclo de crecimiento anual, mediante los métodos micrometeorológicos razón de Bowen (BREB) y covarianza de torbellinos (EC). La investigación se realizó en el 2007 en la localidad semi-árida de Tarazona de La Mancha, España. El principal criterio de comparación entre los sistemas fue el valor diario y acumulado de la ET actual. Una vez forzado el cierre de energía, el sistema BREB sobreestimó los flujos del sistema EC en valores promedio de 5 %. Las diferencias se pueden explicar por la ubicación próxima del brazo inferior del sistema BREB a la cubierta vegetal. Determinadas condiciones de dirección de viento y estabilidad atmosférica indican mayores requerimientos del método BREB con relación a la selección de la altura y ubicación de los sensores sobre la cubierta. La ubicación de los sensores del sistema BREB en una cubierta heterogénea como la viña, debe considerar el impacto de la arquitectura en la homogeneidad de la capa de mezcla. El análisis de la evolución temporal de los valores de ET y del coeficiente de cultivo (Kc), los cuales responden al desarrollo del cultivo e incrementos de humedad de riegos o lluvias, aumenta la fiabilidad de los resultados de ET obtenidos por el sistema EC con forzamiento de cierre. El flujo de calor del suelo (G) presentó diferentes patrones debido a la iluminación y el sombreado y se obtuvo una relación G/Rn para el periodo diurno (0.21) y nocturno (0.68).

ABSTRACT

The comparison of micrometeorological systems enables to analyze the reliability of the results and assess their adjustment to different crops. In the present study the evapotranspiration (ET) of a vineyard cover (*Vitis vinifera*) arranged in a trellis system was measured during its annual growth cycle by using the micrometeorological methods Bowen Ratio Energy Balance (BREB) and Eddy Covariance (EC). The research was conducted in 2007 in the semi-arid area of Tarazona de La Mancha, Spain. The main criterion of comparison between the systems was the daily and cumulative value of current ET. Once the closure of energy was forced, the BREB system overestimated the EC system fluxes in average values of 5 %. The differences can be explained by the close location of the lower arm of the plant cover in BREB system. Certain conditions of wind direction and atmospheric stability indicate higher requirements of the BREB method with respect to the selection of height and location of sensors on the cover. The location of the BREB system sensors in a heterogeneous cover like the vineyard should consider the impact of architecture on the homogeneity of the mixed layer. The analysis of the time evolution of the ET values and crop coefficient (Kc), which respond to crop development and high moisture because of irrigation or rainfall, increases reliability on the ET results obtained by the EC system with forced closure. The soil heat flux (G) presented different patterns due to lighting and shading of the soil providing different G/Rn values for the day (0.21) and night (0.68) periods.

Keywords: *Vitis vinifera*, energy balance, crop coefficient, micrometeorology.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Marzo, 2010. Aprobado: Agosto, 2010.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 45: 87-103. 2011.

Palabras clave: *Vitis vinifera*, balance de energía, coeficiente de cultivo, micrometeorología.

INTRODUCCIÓN

La estimación correcta del uso de agua por los cultivos permite calibrar sistemas de monitoreo remotos (satelital) y en zonas áridas, donde la disponibilidad de agua para la agricultura cada día es menor, representará un ahorro de los recursos hídricos. La estimación de la evapotranspiración (ET) de una cubierta vegetal ha sido mejorada junto con el desarrollo de tecnologías que permiten dar seguimiento a variables micrometeorológicas. Los métodos Covarianzas de Torbellinos (EC) y de Razón de Bowen-Balance de Energía (BREB) son fuente de información para validar modelos de evapotranspiración, generados con datos de campo o imágenes de satélites (Soegaard *et al.*, 2003). Estos sistemas han sido validados sobre diferentes coberturas vegetales con resultados de aceptable precisión (Heilman *et al.*, 1989; Prueger *et al.*, 1997; Todd *et al.*, 2000). Sin embargo, también se ha concluido que las condiciones de estabilidad atmosférica (Twine *et al.*, 2000; Brotzge y Crawford, 2003; Wolf *et al.*, 2008), advección de energía (Dugas *et al.*, 1991; Berengena y Gavilán, 2005) y ubicación del instrumental meteorológico (Cellier y Brunet, 1992; Mahrt, 2000) pueden influir en la sensibilidad y desempeño de los sistemas al evaluar los flujos conducidos por la turbulencia.

El sistema BREB tiene un diseño simple, económico, con base en gradientes de temperatura y vapor de agua entre dos alturas, con bajos requerimientos de fetch (Heilman *et al.*, 1989; Stannard, 1997). El sistema EC, más sofisticado y caro, tiene sus bases en la determinación de la correlación entre las fluctuaciones de la concentración de un escalar (agua, CO₂, momento, entre otros) y las fluctuaciones de la velocidad vertical del viento. Este método es una referencia entre los métodos micrometeorológicos (Monteith y Unsworth, 2007) y se ha utilizado en cultivos agrícolas, bosques y vegetación natural.

En viñedos se ha estudiado la evapotranspiración y los componentes del balance de energía (Li *et al.*, 2008) pero se compara poco el desempeño de los métodos EC y BR. La proporción de la radiación interceptada por la vegetación y el suelo, el desarrollo de la cobertura vegetal y el régimen de humedad del suelo son los principales factores que conducen

INTRODUCTION

The correct estimate of water use by crops allows calibrating remote monitoring (satellite) systems, and will represent a saving of water resources in arid areas where water availability for agriculture is declining day by day. The estimation of the evapotranspiration (ET) of a plant cover has been improved together with the development of technologies that enable to follow up micrometeorological variables. The methods of Eddy Covariance (EC) and Bowen-Ratio Energy Balance (BREB) are sources of information to validate models of evapotranspiration generated with field data or satellite images (Soegaard *et al.*, 2003). These systems have been validated on different plant covers with results of acceptable accuracy (Heilman *et al.*, 1989; Prueger *et al.*, 1997; Todd *et al.*, 2000). However, as reported by some authors, the conditions of atmospheric stability (Twine *et al.*, 2000; Brotzge and Crawford, 2003; Wolf *et al.*, 2008), advection of energy (Dugas *et al.*, 1991; Berengena and Gavilán, 2005) and the location of meteorological instruments (Cellier and Brunet, 1992; Mahrt, 2000) may influence the sensitivity and performance of systems in evaluating the fluxes driven by turbulence.

The BREB system has a simple, economical design, based on gradients of temperature and water vapor between two levels, with low requirements of fetch (Heilman *et al.*, 1989; Stannard, 1997). The EC system, more sophisticated and expensive, is based on determining the correlation between fluctuations of the concentration of a scalar (water, CO₂, momentum, among others) and the fluctuations of the vertical wind speed. This method is a benchmark among the micrometeorological methods (Monteith and Unsworth, 2007) and has been used in agricultural crops, forests and natural vegetation.

In vineyards, evapotranspiration and the energy balance components have been studied (Li *et al.*, 2008) but the EC and BR methods performance in these sites is rarely compared. The proportion of the radiation intercepted by vegetation and the soil, the development of plant cover and the soil moisture regime are the main factors leading the exchange of energy between the surface and atmosphere. The heterogeneity of its cover, with a strong presence of bare soil, and three-dimensional architecture induce a particular

el intercambio de energía entre la superficie y la atmósfera. La heterogeneidad de su cobertura, con una fuerte presencia de suelo desnudo, y la arquitectura tridimensional inducen a una particular distribución de la energía entre los componentes del balance. También, procesos advectivos locales debidos a la presencia relevante de suelo desnudo, efectos de la rugosidad sobre el desarrollo de las capas atmosféricas, desigualdad entre los coeficientes turbulentos de calor, agua, momento, y otros pueden hacer que los flujos de energía sean anisótropos y fuertemente dependiente de la estabilidad y dirección del viento (Weiss y Allen Jr., 1976; Cellier y Brunet, 1992; Mahrt, 2000).

La hipótesis del presente estudio fue que la capacidad de los sistemas micrometeorológicos evaluados para estimar adecuadamente la ET actual son útiles en el seguimiento y pronóstico del coeficiente de cultivo (K_c). El objetivo fue evaluar y comparar el desempeño de los métodos EC y BREB en la estimación de la ET diaria en un viñedo regado. Como resultado destacable se propone una parametrización del flujo de calor del suelo (G) a partir de valores de radiación y actualizar el balance de energía.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se efectuó en un viñedo con producción comercial ubicado en Tarazona de La Mancha (39° 17' N, 1° 59' O, 700 m), provincia de Albacete, España. El viñedo tiene 26 ha con plantas de 13 años, dispuestas en espaldera en un marco de 3 m × 1.5 m, orientadas norte-sur (azimut 170° desde el norte). En la Figura 1 se muestra la localización del viñedo experimental y la de los sistemas micrometeorológicos. El tipo de suelo es clasificado como Petrocalcic Calcixerepts, con una profundidad superior a 1 m, pedregosidad común y textura franca. La altura de la vegetación al comienzo de la temporada fue 70 cm y al final 164 cm, con un anchura media del follaje de 70 cm (Figura 2B) y la cobertura máxima alcanzó 30 % (Campos *et al.*, 2010).

La variedad predominante es Cencibel y en menor proporción Cabernet Sauvignon, Merlot y Syrah. El riego es por goteo, cada 12 d, 12 h y no hubo síntomas de estrés hídrico. El clima es continental, con una temperatura promedio anual de 13.7 °C. Durante el experimento (2007) la precipitación fue 354 mm y el rendimiento promedio fue 16 t ha⁻¹, con niveles de alcohol probable de 13 a 14 °Baume considerados normales. El periodo comparativo comprendió 68 d, desde el 17 de mayo (día juliano (DJ 137) al 26 de julio de 2007 (DJ 206).

energy distribution between the balance components. Also, local advective processes due to the significant presence of bare soil, the effects of roughness on the development of the atmospheric layers, inequality between the turbulent coefficients of heat, water, momentum, and others can make energy flux be anisotropic and strongly dependent on wind stability and direction (Weiss and Allen Jr., 1976; Cellier and Brunet, 1992; Mahrt, 2000).

The hypothesis of the present study was that the capacity of the micrometeorological systems evaluated here to properly estimate the current ET is a useful tool in monitoring and forecasting the crop coefficient (K_c). The objective was to evaluate and compare the performance of the EC and BREB methods in the estimation of daily ET in an irrigated vineyard. As a result worth noting, a parameterization of soil heat flux (G) from solar radiation levels is proposed, as well as updating the energy balance.

MATERIALS AND METHODS

The experiment was conducted in a commercial production vineyard located in Tarazona de La Mancha (39° 17' N, 1° 59' W, 700 m), province of Albacete, Spain. The vineyard has 26 ha, with plants of 13 years old, arranged on a trellis in a frame of 3 m × 1.5 m, oriented north-south (azimuth 170° from north). The experimental vineyard location and that of the micrometeorological systems is shown in Figure 1. The soil type is classified as Petrocalcic Calcixerepts, with a depth exceeding 1 m, common stone content and loamy texture. The height of vegetation at the beginning of the growth season was 70 cm, and 164 cm by the end, with an average width of foliage of 70 cm (Figure 2B); and the maximum green cover fraction reached 30 % (Campos *et al.*, 2010).

The predominant variety is Cencibel and in a lower proportion Cabernet Sauvignon, Merlot and Syrah. Drip irrigation was applied every 12 d with a duration of 12 h each and did not show symptoms of water stress. The climate is continental with an average temperature of 13.7 °C. During the experiment (2007) rainfall was 354 mm and the average yield was 16 t ha⁻¹, with probable alcohol levels between 13 and 14 ° Baume, considered normal. The comparative period included 68 d, from May 17 (Julian day (JD 137)) to July 26, 2007 (JD 206).

Measurement of net radiation (R_n) and soil heat flux (G)

The calculation of the energy available for turbulent fluxes will depend on the correct assessment of R_n and G (Brotzge

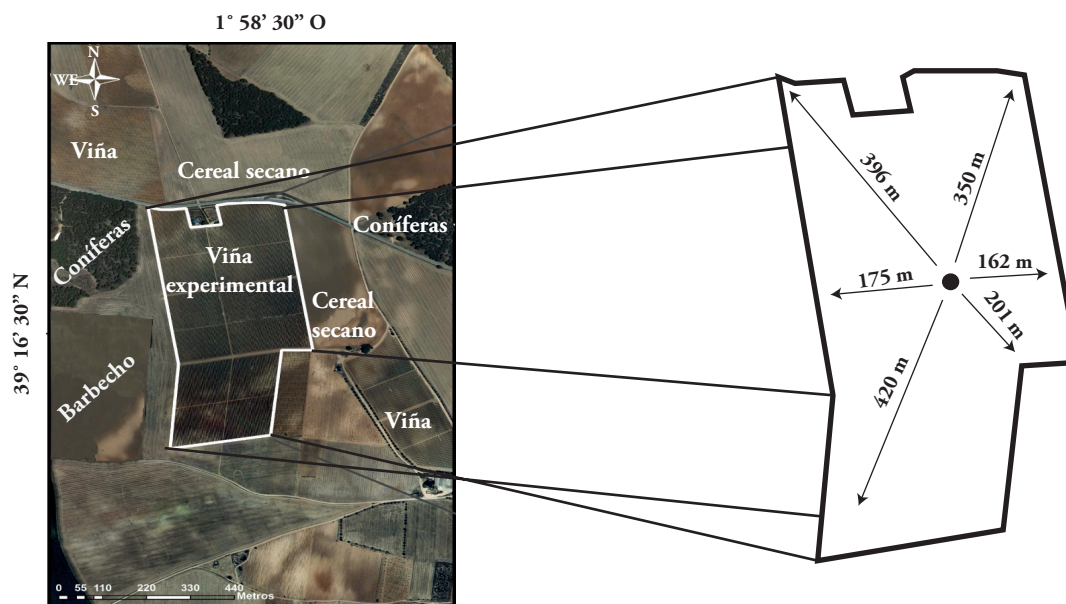


Figura 1. Viñedo experimental y ubicación de los sistemas micrometeorológicos.
Figure 1. Experimental vineyard and location of micrometeorological systems.

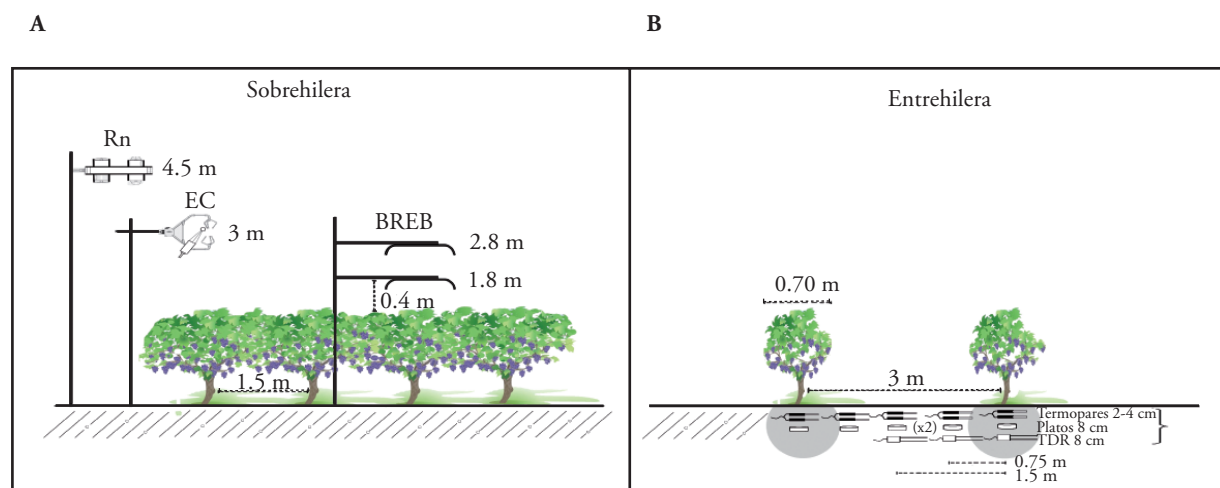


Figura 2. Ubicación: A) radiómetro neto, sensores de EC y BREB; y B) sensores flujo de G.
Figure 2. Location: A) net radiometer, EC and BREB sensors; and B) G flux sensors.

Medición de la radiación neta (R_n) y flujo de calor del suelo (G)

El cálculo de la energía disponible para los flujos turbulentos dependerá de la evaluación correcta de R_n y G (Brotzge y Crawford, 2003) y errores en su medida afectarán el desempeño de los sistemas BREB y de los métodos de cierre forzado en EC (Twine *et al.*, 2000). La R_n ($W\ m^{-2}$) fue evaluada con un

and Crawford, 2003), and errors in measurement will affect the performance of the BREB systems and methods of forcing closure in EC (Twine *et al.*, 2000). The R_n ($W\ m^{-2}$) was evaluated with a net CNR1 radiometer (KIPP & ZONEN, Netherlands) located 4.5 m aboveground. Since the heterogeneous nature of the cover and the vineyard architecture in trellis introduce lighting and shading patterns that can have an effect on the heat flux in the soil (Heilman *et al.*, 1994), the values of G ($W\ m^{-2}$)

radiómetro neto CNR1, (KIPP&ZONEN, Holanda), ubicado a 4.5 m sobre el suelo. Dado que la cobertura es heterogénea y la arquitectura de la viña en espaldera introducen patrones de iluminación y sombreado que pueden tener efecto en los flujos de calor en el suelo (Heilman *et al.*, 1994), los valores de G ($W m^{-2}$) se midieron en tres posiciones espacialmente representativas del suelo de la viña (en la zona de las plantas, a 0.75 m y 1.5 m desde la hilera de plantas; Figura 2B). El valor de G se calculó con el método combinado (Payero *et al.*, 2005), el cual corrige los flujos térmicos medidos por los platos enterrados, evaluando la capacidad térmica del suelo superficial midiendo el cambio en su temperatura en el tiempo y el efecto del contenido de humedad en el suelo. Para esto, en las tres posiciones descritas se ubicaron platos HFP01 (Hukseflux, Holanda) enterrados a 8 cm y termopares de cromo-constantán (TCAV, Tipo E) a 2 cm y 4 cm de profundidad junto a un reflectómetro de humedad volumétrica (θ_v) CS616 (Campbell Sci. Inst., USA).

Medidas de Razón de Bowen-balance de energía (BREB)

El método BREB requiere calcular la energía disponible ($R_n - G$) y los gradientes de temperatura y humedad sobre el cultivo. La distribución de la energía entre los flujos de calor sensible (H , $W m^{-2}$) y latente (λE , $W m^{-2}$) se calculó con la razón de Bowen (β , adimensional) medida instrumentalmente en campo (Rosenberg *et al.*, 1983; Monteith y Unsworth, 2007):

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta q} \quad (1)$$

donde, γ ($kPa ^\circ C^{-1}$) es la constante psicrométrica; ΔT ($^\circ C$) y Δq (kPa) corresponden a los gradientes de temperatura y concentración de vapor de agua a dos alturas. Luego se usa β conjuntamente con la energía disponible para calcular los flujos turbulentos:

$$\lambda E = \frac{(R_n - G)}{1 + \beta} ; \quad H = \frac{(R_n - G)}{1 + \beta^{-1}} \quad (2)$$

Los gradientes fueron evaluados con sensores en dos brazos, dispuestos en el sentido de la hilera de plantas y separados a 1 m entre sí (Figura 2). El brazo inferior estuvo ubicado 40 cm sobre la parte alta de la vegetación. El gradiente de temperatura fue evaluado con dos termopares de hilo fino tipo E (cromo-constantán) ASPTC + 107 T. P (Campbell Sci. Inst., USA) y el gradiente de humedad con un espejo de punto de rocío Almemo®-FHA646DTC1 (Ahlborn Mess. und R., Alemania), compartido por ambos brazos y alimentado alternadamente desde cada altura

were measured at three positions spatially representative of the vineyard soil (the area covered by plants, at 0.75 m and 1.5 m from the plant row; Figure 2B). The value of G was calculated using the combined method (Payero *et al.*, 2005), which corrects the heat fluxes measured by the flux plates buried evaluating the heat capacity of surface soil, measuring the change in temperature over time and the effect of moisture content on the soil. On this account, in each of the three positions described, a HFP1 plate (Hukseflux, Netherlands) was placed, buried 8 cm deep, and two chrome-constantan thermocouples (TCAV, Type E) at 2 cm and 4 cm depth together with a volumetric moisture reflectometer (θ_v) CS616 (Campbell Sci. Inst., USA).

Bowen Ratio Energy Balance measures (BREB)

The BREB method requires calculating the energy available ($R_n - G$) and gradients of temperature and humidity above the crop. The distribution of energy between sensible (H , $W m^{-2}$) and latent heat fluxes (λE , $W m^{-2}$) was calculated with the Bowen ratio (β , dimensionless), measured instrumentally in field (Rosenberg *et al.*, 1983, Monteith and Unsworth, 2007):

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta q} \quad (1)$$

where γ ($kPa ^\circ C^{-1}$) is the psychrometric constant; ΔT ($^\circ C$) and Δq (kPa) are the gradients of temperature and water vapor concentration at two heights. β is then used in conjunction with the energy available to calculate turbulent fluxes:

$$\lambda E = \frac{(R_n - G)}{1 + \beta} ; \quad H = \frac{(R_n - G)}{1 + \beta^{-1}} \quad (2)$$

The gradients were evaluated with sensors in two arms arranged in the direction of the row of plants and 1 m apart from each other (Figure 2). The lower arm was located 40 cm above the top of the vegetation. The temperature gradient was evaluated with two fine wire thermocouples type E (chromium constantan) ASPTC + 107 T. P (Campbell Sci. Inst., USA) and the moisture gradient with a unique dew point mirror Almemo®-FHA646DTC1 (Ahlborn Mess. und R., Germany), shared by both arms and supplied alternately from each height by solenoid valves. The data corresponded to 20-min means recorded in a CR23X model data logger (Campbell Sci. Inst., England). The values were refined in accordance with the methodology proposed by Ohmura (1982) and Unland *et al.* (1996) which rejects values close to the resolution of the sensors or times of

mediante electroválvulas. Los datos correspondieron a medias de 20 min y se almacenaron en un registrador de datos (data logger) CR23X (Campbell Sci. Inst., Inglaterra). Los valores se depuraron según la metodología propuesta por Ohmura (1982) y Unland *et al.* (1996) la cual rechaza valores cercanos a la resolución de los sensores o momentos del día cuando los valores de β están cercanos a -1 , por lo que el flujo estimado se hace infinito. En cuanto a los límites de la parcela, el borde más cercano estableció un "fetch" mínimo para este equipo de 60:1 desde el este, el cual se aleja del valor mínimo de 20:1 indicado para sistemas BREB por Heilman *et al.* (1989). Siguiendo el método propuesto por Schuepp *et al.* (1990) se calculó que 90 % del flujo acumulado provino de un área limitada a 133 m para el brazo superior y a 27 m para el inferior, con distancias de contribución máxima al sensor de 7 y 2 m.

Medidas Eddy covarianzas (EC)

El sistema EC permite evaluar directamente el flujo de calor latente (λE) y sensible (H) a partir de la variación de la velocidad vertical del viento y de la densidad de vapor de agua y de la temperatura (Monteith y Unsworth, 2007). Los flujos se calcularon con las covarianzas:

$$\lambda E = \lambda \times \overline{w' \rho_v'}; \quad H = C_p \times \rho_a \times \overline{w' T'} \quad (3)$$

donde, λE ($W m^{-2}$) es el flujo de calor latente; λ ($J kg^{-1}$) el calor latente de vaporización; w' ($m s^{-1}$) la variación instantánea de la velocidad vertical del viento; ρ_v' ($kg m^{-3}$) la variación instantánea de la densidad de vapor de agua; H ($W m^{-2}$) el flujo de calor sensible; C_p ($1013 kJ kg^{-1} ^\circ C^{-1}$) el calor específico del aire húmedo; ρ_a ($kg m^{-3}$) la densidad del aire; y T' ($^\circ C$) la variación de la temperatura del aire ($^\circ C$). Las barras sobre las letras indican medias temporales y las primas indican desviaciones de los valores desde las medias temporales. El sistema se instaló en la parte central del huerto y consistió en un anemómetro sónico CSAT-3 (Campbell Sci. Inst., Inglaterra), un analizador de gases en el infrarrojo con sistema abierto LI-7500 (LI-COR Inc., USA) y registros a 10 Hz (0.1s), un sensor de humedad y temperatura HMP45C (Vaisala, Finlandia) y un "datalogger" CR5000 (Campbell Sci. Inst., Inglaterra) en el que se computaron las estadísticas y la corrección de densidad del aire (Webb *et al.*, 1980). Los datos se integraron en tablas de alta frecuencia y flujos cada 30 min. El proceso posterior se realizó con el programa de cómputo TK2 (Mauder *et al.*, 2008) el cual corrige principalmente efectos de la separación entre sensores, atenuaciones de frecuencia por promedios temporales, longitud del sensor, valores espurios, y otros. Los sensores se ubicaron a 3 m sobre el suelo, orientados al noroeste, dirección de los vientos predominantes (Figura 2A). El valor mínimo de fetch para esta altura fue 55:1. Con la metodología de Schuepp *et*

the day when the values of β are close to -1 , so the estimated λE flux becomes infinite. As to the limits of the plot, the nearest edge established a minimal fetch for this system of 60:1 from the east, which moves away from the minimum value of 20:1 indicated for BREB systems by Heilman *et al.* (1989). Following the method proposed by Schuepp *et al.* (1990), 90% of the accumulated flux was calculated to come from a limited area to 133 m for the upper arm and 27 m for the lower, with distances of maximum contribution to the sensor of 7 and 2 m.

Eddy covariance (EC) measurements

The EC system allows to directly evaluate the latent (λE) and sensible heat flux (H) from the variation of the vertical wind speed and water vapor density and temperature (Monteith and Unsworth, 2007). Fluxes are calculated with covariances:

$$\lambda E = \lambda \times \overline{w' \rho_v'}; \quad H = C_p \times \rho_a \times \overline{w' T'} \quad (3)$$

where λE ($W m^{-2}$) is the latent heat flux; λ ($J kg^{-1}$) the latent heat of vaporization; w' ($m s^{-1}$) the instantaneous variation of the vertical wind speed; ρ_v' ($kg m^{-3}$) the instantaneous variation of water vapor density; H ($W m^{-2}$) the sensible heat flux; C_p ($1013 kJ kg^{-1} ^\circ C^{-1}$) the specific heat of humid air; ρ_a ($kg m^{-3}$) the air density; and T' ($^\circ C$) the variation of air temperature ($^\circ C$). The bars above the letters indicate time mean values and premiums point to deviations of values from the time averages. The system was installed in the central part of the vineyard plot and consisted of a sonic anemometer CSAT-3 (Campbell Sci. Inst., England), a infrared gas analyzer LI-7500 open system (LI-COR Inc., USA) and registries at 10 Hz (0.1s), a humidity and temperature sensor HMP45C (Vaisala, Finland) and a datalogger CR5000 (Campbell Sci. Inst., England) in which statistics were computed as well as the air density correction (Webb *et al.*, 1980). The data were incorporated into high frequency tables and fluxes every 30 min. The subsequent process was performed using the software TK2 (Mauder *et al.*, 2008) which mainly corrects the effects of separation between sensors, frequency attenuations by time averages, sensor length, spurious values, and others. The sensors were located at 3 m above the ground, oriented northwest, in the direction of prevailing winds (Figure 2A). The minimum value of fetch for this height was 55:1. Following the methodology proposed by Schuepp *et al.* (1990), 90 % of the cumulative fluxes originated within an area limited to 159 , with the maximum contribution to the flux at 8 m from the tower.

Method for the analysis of the energy balance closure

The energy balance closure was evaluated at hourly time scale, with the ratio between the sum of aerodynamic fluxes

al. (1990) se calculó que 90 % de los flujos acumulados tuvieron su origen dentro de una área limitada a 159 m, con la contribución máxima al flujo a 8 m de la torre.

Método para el análisis del cierre del balance de energía

El cierre del balance de energía se evaluó en escala horaria, con la relación entre la suma de los flujos aerodinámicos ($\lambda E + H$) y la energía disponible ($Rn - G$) conocida como relación del balance de energía (EBR) (Twine *et al.*, 2000). La ecuación usada fue:

$$EBR(\%) = \frac{(H + \lambda E)}{(Rn - G)} \times 100 \quad (4)$$

Considerando que las medidas de Rn y G son representativas de la energía disponible, los valores de los flujos forzados o corregidos en el periodo diurno son (Twine *et al.*, 2000):

$$\lambda E = \frac{(Rn - G)}{(1 + \beta)}; \quad H = \frac{(Rn - G)}{(1 + \beta^{-1})} \quad (5)$$

Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0)

Con objetivo de analizar la capacidad de los sistemas para monitorear el desarrollo del cultivo se calculó el coeficiente de cultivo ($Kc = ET_{actual} / ET_0$) con la ET actual indicada por cada equipo y la ET_0 (mm d^{-1}) con la ecuación FAO56 Penman Monteith (Allen *et al.*, 1998). Las variables meteorológicas medidas fueron: radiación solar (Wm^{-2}), velocidad del viento (ms^{-1}), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y humedad del aire (%) a 2 m de altura. La radiación solar reflejada se modeló al utilizar el albedo de una superficie de referencia (0.23). La radiación neta de onda larga se modeló con el procedimiento descrito en FAO56 (Allen *et al.*, 1998).

Estadísticos comparativos

Los flujos de energía reportados por ambos sistemas se compararon usando regresión simple y los estadísticos coeficiente de determinación (R^2), pendiente (b) e intersección del eje (a), cuadrado medio del error (RMSE) e índice de acuerdo (I.A.) con base en la propuesta de Willmott (1982).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones del cultivo

En el desarrollo de la cubierta vegetal del viñedo (Figura 3) se consideraron dos fases: una de

($\lambda E + H$) and available energy ($Rn - G$), known as energy balance ratio (EBR) (Twine *et al.*, 2000). The equation used was:

$$EBR(\%) = \frac{(H + \lambda E)}{(Rn - G)} \times 100 \quad (4)$$

Considering that the measures of Rn and G are representative of the energy available, the values of forced or corrected fluxes in the day period are (Twine *et al.*, 2000):

$$\lambda E = \frac{(Rn - G)}{(1 + \beta)}; \quad H = \frac{(Rn - G)}{(1 + \beta^{-1})} \quad (5)$$

Calculation of the reference evapotranspiration (ET_0)

In order to analyze the system capacity to monitor crop development, the crop coefficient ($Kc = ET_{current} / ET_0$) was estimated with current ET indicated by each system and ET_0 (mm d^{-1}) with the FAO56 Penman Monteith equation (Allen *et al.*, 1998). The meteorological variables measured were: solar radiation (Wm^{-2}), wind speed (ms^{-1}), temperature ($^{\circ}\text{C}$) and air humidity (%) at 2 m high. The reflected solar radiation was modeled by using the albedo of a reference surface (0.23). The net longwave radiation was modeled using the procedure described in FAO56 (Allen *et al.*, 1998).

Comparative statistics

The energy fluxes reported by both systems were compared using simple regression and the statistical coefficient of determination (R^2), slope (b) and intersection of the axis (a), mean square error (RMSE) and index of agreement (I.A.), based on the proposal by Willmott (1982).

RESULTS AND DISCUSSION

Crop conditions

In the development of the vineyard plant cover (Figure 3) two phases were considered: a vegetative growth phase, which begins on DJ 120 with the appearance of the first 2 or 3 leaves and ends on DJ 180 with a cover fraction (F_c) of 31 % (Campos *et al.*, 2010); and a second phase, from this day until DJ 206, a period during which the plant cover remained unchanged in shape, height and volume (reference period). This period (DJ 180-206) will serve to analyze changes in the energy balance not attributable to changes in the cover.

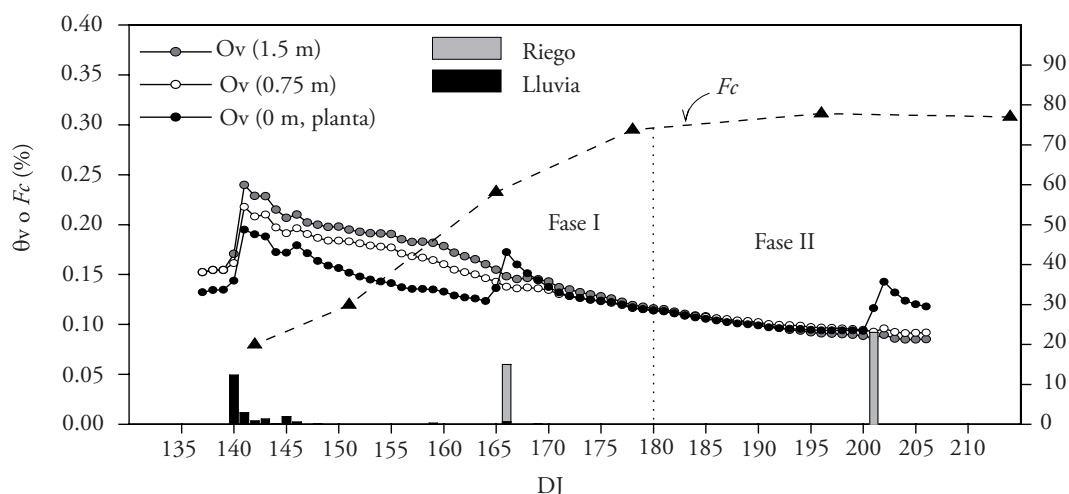


Figura 3. Evolución de F_c , humedad volumétrica del suelo y momentos de riego o lluvia.
Figure 3. Evolution of F_c , volumetric moisture of the soil and moments of irrigation or rainfall.

crecimiento vegetativo, que se inicia el DJ 120 con la aparición de las primeras 2 o 3 hojas y finaliza el DJ 180 con una fracción de cobertura (F_c) de 31 % (Campos *et al.*, 2010); y una segunda fase, desde este día hasta el DJ 206, período en que la cubierta vegetal permaneció sin cambios en forma, altura y volumen (período de referencia). Este período (DJ 180-206) servirá para analizar cambios en el balance de energía no atribuibles a cambios en la cubierta.

Flujo de calor en la superficie del suelo y radiación

Los valores positivos de G fueron en promedio similares entre las tres posiciones y las mayores diferencias se observaron en el periodo negativo (nocturno) en el sitio bajo las plantas donde las temperaturas en promedio son menores (Cuadro 1).

Con base en esas diferencias es posible indicar que los muestreos en la posición central entre hileras podrían ser suficientes y representativos del flujo promediado espacialmente. El flujo bajo las plantas mostró dos picos, uno a media mañana (10:00) y otro a media tarde (15:00) con una gran bajada en la parte central del día (12:00) debido al patrón de iluminación. El valor de G promedio, representativo para el flujo en la viña, alcanzó valores máximos de 158 Wm^{-2} en el día y mínimos de -58 Wm^{-2} en la noche. También se observó que los valores máximos de G promedio presentan un desfase temporal respecto a la máxima R_n diaria (Figura 4), que es de 2 h (Olivier y Sene, 1992; Foken *et al.*, 2006).

Heat flux on the surface soil and radiation

The average of G positive values were similar for all three positions and the major differences were observed in the negative period (night) at the site under the plants where the average temperatures are lower (Table 1).

Based on these differences it is possible to indicate that sampling in the central position between rows might be sufficient and representative of the flux spatially averaged. The flux under the plants showed two peaks, one at mid-morning (10:00) and another at mid-afternoon (15:00) with a large drop at midday (12:00) due to the light pattern. The average G value, representative of the vineyard flux, reached maximum values of 158 Wm^{-2} in daytime and minimum of -58 Wm^{-2} at night. It was also noted that the maximum values of average G present a time delay in relation to the daily maximum R_n (Figure 4), of 2 h (Oliver and Sene, 1992; Foken *et al.*, 2006).

Cuadro 1. Promedio del flujo positivo, negativo y diario de G en los sitios estudiados.

Table 1. Positive, negative and daily average flux of G in the sites studied.

Distancia a las plantas (m)	$G(+)$	$G(-)$	G (día)
	(Wm^{-2})		
0	108.4	-64.3	7.6
0.75	111.0	-42.1	8.9
1.5	109.0	-41.7	8.5
Promedio	109.5	-49.4	8.4

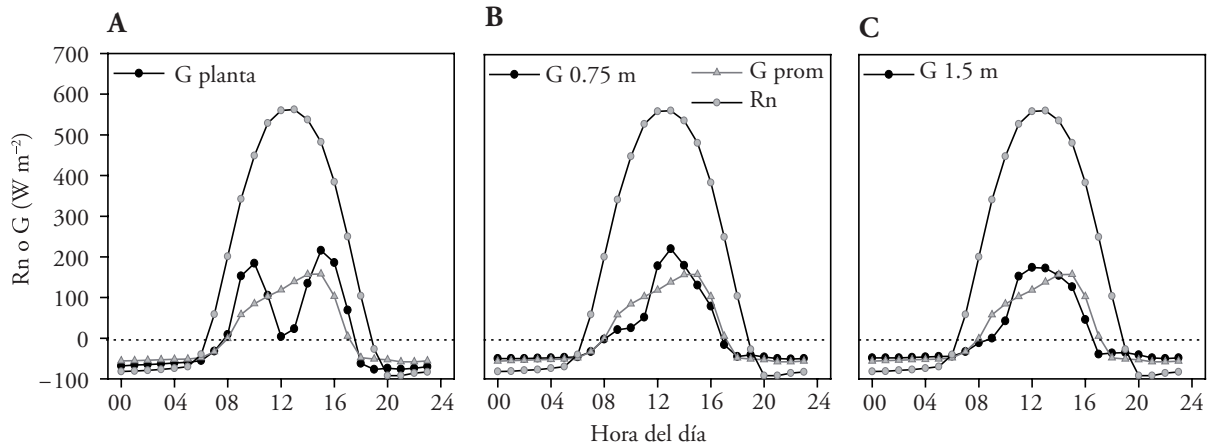


Figura 4. Cambio de G en dependencia del tiempo, en A) zona de plantas, B) 0.75 m y C) 1.50 m. El valor G promedio (G prom) de las tres zonas se indica con los triángulos. Se incluye el ciclo de Rn.

Figure 4. G change depending on the time in A) zone of plants, B) 0.75 m, and C) 1.50 m. The average G value (G prom) of the three areas is indicated by triangles. The daily cycle of Rn is included.

Los valores de los cocientes entre los promedios diarios de G y la radiación solar incidente (G/R_{is}), la radiación neta solar (G/R_{ns}) y la radiación neta (G/R_n) del período diurno y el nocturno se presentan separados (Figura 5). Los valores del cociente G/R_n se estabilizaron en 0.21 en el día y 0.68 en la noche y fueron similares a los de Hicks (1973).

Análisis del cierre del balance de energía en el sistema EC en escala horaria

Para calcular las diferencias horarias, el valor de G se desfasó 1 h (+1). La suma de los flujos turbulentos ($\lambda E + H$) fue inferior a la energía disponible ($R_n - G$) (Figura 6 A). Otros autores reportaron resultados similares (Barr *et al.*, 1994; Twine *et al.*, 2000; Brotzge y Crawford, 2003). Los valores de EBR fueron bajos durante el período nocturno (36.3 %) hasta las primeras horas del día, momento en que inicia el desarrollo de turbulencias. Durante el período diurno, al aumentar los flujos de energía y el desarrollo de las turbulencias, también aumenta el EBR (Figura 6 A). Esto se corroboró con un mejor ajuste entre los valores diurnos medidos por el sistema EC y la energía disponible [$\lambda E + H = 0.85 (R_n - G) + 21.51$; $R^2 = 0.94$; $\pm$ RMSE de 48.91] (Figura 6 B). Durante el período de referencia, el valor promedio diurno ($R_n > 50 \text{ W m}^{-2}$) del EBR fue 95.29 % (desviación estándar DE ± 15.34 %). Considerando todo el período experimental, el valor promedio diurno del EBR fue 91.8 % (DE ± 18.9 %). Estos valores indican un déficit en

The values of the ratios between the daily averages of G and incident solar radiation (G/R_{is}), net solar radiation (G/R_{ns}) and net radiation (G/R_n) of the daytime and night periods are presented separated (Figure 5). The values of the G/R_n ratio stabilized at 0.21 the daytime and 0.68 at night, and were similar to those of Hicks (1973).

Analysis of the energy balance close in the EC system at hourly time scale

To calculate hourly differences, the value of G was offset 1 h (+1). The sum of turbulent fluxes ($\lambda E + H$) was less than the available energy ($R_n - G$) (Figure 6 A). Similar results were reported by other authors (Barr *et al.*, 1994; Twine *et al.*, 2000; Brotzge and Crawford, 2003). The EBR values were low during the night (36.3%) until the early hours of the day when the development of turbulences begins. During daytime, as the energy fluxes and the development of turbulences increase, the EBR also does (Fig. 6 A). This was corroborated with a better adjustment between the daytime values measured by the EC system and available energy [$\lambda E + H = 0.85 (R_n - G) + 21.51$; $R^2 = 0.94$; $\pm$ RMSE of 48.91] (Figure 6 B). During the period of reference, the average daytime value ($R_n > 50 \text{ W m}^{-2}$) of the EBR was 95.29 % (standard deviation, SD ± 15.34 %). Considering the entire experimental period, the average daytime value of the EBR was 91.8 % (SD ± 18.9 %). These values indicate a deficit in the energy balance closure

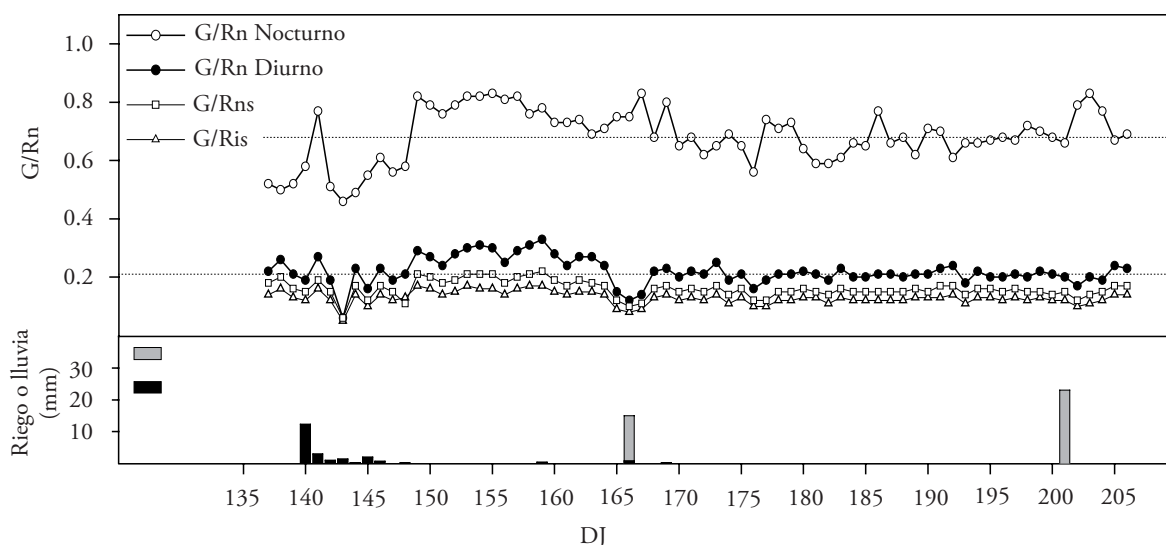


Figura 5. Comportamiento temporal de la relaciones G/Rn, G/Ris y G/Rns.

Figure 5. Time behavior of the G/Rn, G/Ris and G/Rns.

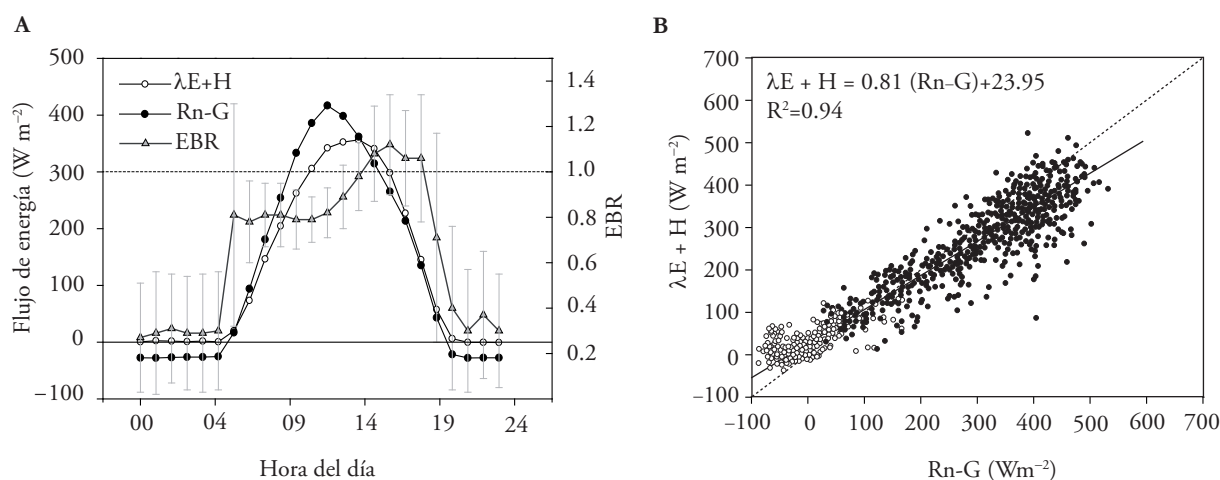


Figura 6. A) Distribución de los flujos energía y EBR en el día; y B) prueba de correlación.

Figure 6. A) Distribution of energy fluxes and EBR during the day, and B) correlation test.

el cierre del balance de energía de alrededor de 5 % en el día. Las agrupaciones temporales de los flujos, el valor promedio de EBR en escala diaria (Rn-G y $\lambda E + H$ acumulados en 24 h) fue 101 % ($DS \pm 6$ %), similar al señalado por Oliver y Sene (1992) en viñas. En la Figura 7 se indican los valores diarios del EBR horario diurno y del EBR diario (calculado de los flujos acumulados durante 24 h).

Las diferencias en el análisis del cierre con diferentes agrupamientos temporales de los flujos, probablemente refleja el desfase temporal entre los componentes del balance de energía, y el diferente sentido

of around 5 % in daytime. Time grouping of fluxes, the EBR average value in a daily scale (Rn-G and $\lambda E + H$ accumulated in 24 h) was 101 % ($SD \pm 6$ %), similar to those reported by Oliver and Sene (1992) in vineyards. Figure 7 shows the daily values of daytime EBR and daily EBR (calculated from the fluxes accumulated in 24 h).

The differences in the analysis of the closure with different time periods of fluxes probably reflect the time lag between the components of the energy balance and the different sense of the systematic errors committed by EC (Foken *et al.*, 2006). However, if

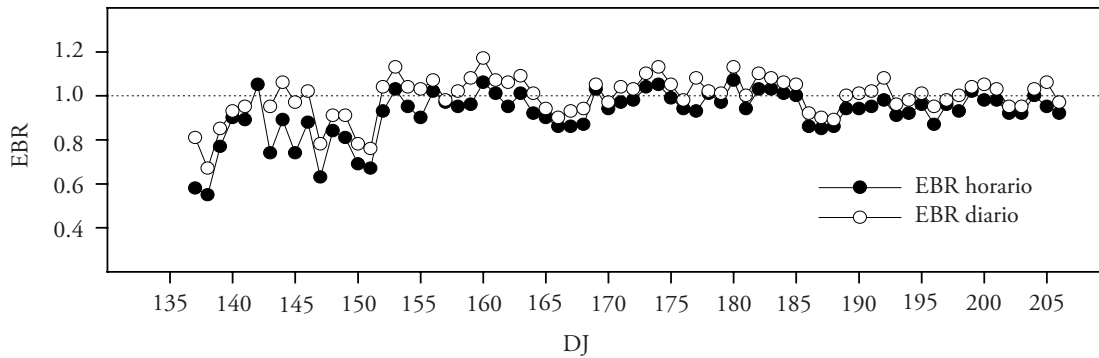


Figura 7. Variación diaria del EBR a escala horaria.
Figure 7. The EBR daily variation at hourly time scale.

de los errores sistemáticos cometidos por EC (Foken *et al.*, 2006). Sin embargo, si se suma la totalidad de $(\lambda E + H)$ y $(R_n - G)$ se alcanza un valor de EBR de 98.7 % (Blanken *et al.*, 1998). Este resultado puede deberse al diferente sentido de los flujos no detectados durante el día y la noche.

Forzamiento del cierre

De acuerdo con Twine *et al.* (2000) y considerando el cultivo de vid, durante el período nocturno se asigna a H los residuales del déficit de cierre, dado que los estomas están cerrados y el déficit de presión de vapor es bajo. En el período diurno el reparto se hace en función de la razón Bowen calculada con EC (Twine *et al.*, 2000), asignando proporcionalmente el déficit entre H y λE . En este sentido la literatura no es concluyente sobre la forma de asignar el déficit cierre y se considera posible hacerlo en las dos vías. Este aspecto se analizó al comparar los valores de la razón de Bowen ($\beta = H/\lambda E$) medidos por ambos equipos (β_{EC} y β_{BREB}). Las comparaciones (Figura 8) se realizaron durante el período diurno ($R_n > 50 \text{ Wm}^{-2}$) por el menor desempeño que se asoció al desarrollo incompleto de las turbulencias (Dugas *et al.*, 1991). En las primeras tres semanas ambos equipos mostraron diferencias en el comportamiento de β , probablemente debido a los nublados, lluvias y agua sobre ellos. Las diferencias entre los valores de β disminuyeron en la medida que se fue secando el suelo y la evapotranspiración se debió casi exclusivamente a las plantas.

Posteriormente, con temperaturas y cobertura del cultivo mayores, los valores de β de ambos equipos disminuyeron a menos de 1, evidenciando mayor asignación al flujo de λE y ambos β se mantuvieron

the total of $(\lambda E + H)$ and $(R_n - G)$ are added up, an EBR value of 98.7 % is reached (Blanken *et al.*, 1998). This result may be due to the different direction of the fluxes not detected during day and night.

Forced closure

According to Twine *et al.* (2000) and considering the cultivation of vines, during the nocturnal period the residual of closure deficit was assigned to H , as the stomatas are closed and the vapor pressure deficit is low. In the daytime period the distribution is made according to the Bowen ratio calculated with EC (Twine *et al.*, 2000), proportionally allocating the deficit between H and λE . In this sense the literature is not conclusive on how to allocate the closure deficit and it is being considered to do so in the two ways. This aspect was analyzed by comparing the values of the Bowen ratio ($\beta = H/\lambda E$) measured by both systems (β_{EC} and β_{BREB}). Comparisons (Figure 8) were carried out during the diurnal period ($R_n > 50 \text{ Wm}^{-2}$) because of the lower performance that was associated with the incomplete development of turbulences (Dugas *et al.*, 1991). In the first three weeks both systems showed differences in the behavior of β , probably due to clouds, rain and water on such systems. The differences between the β values decreased as the soil dried up and evapotranspiration was due almost entirely to plants.

Subsequently, with higher temperatures and larger crop cover, the values of β from both systems decreased to less than 1, showing greater allocation to the λE flux and both β remained constant throughout the day, exhibiting lower values in the evening. The β_{BREB} values were lower than

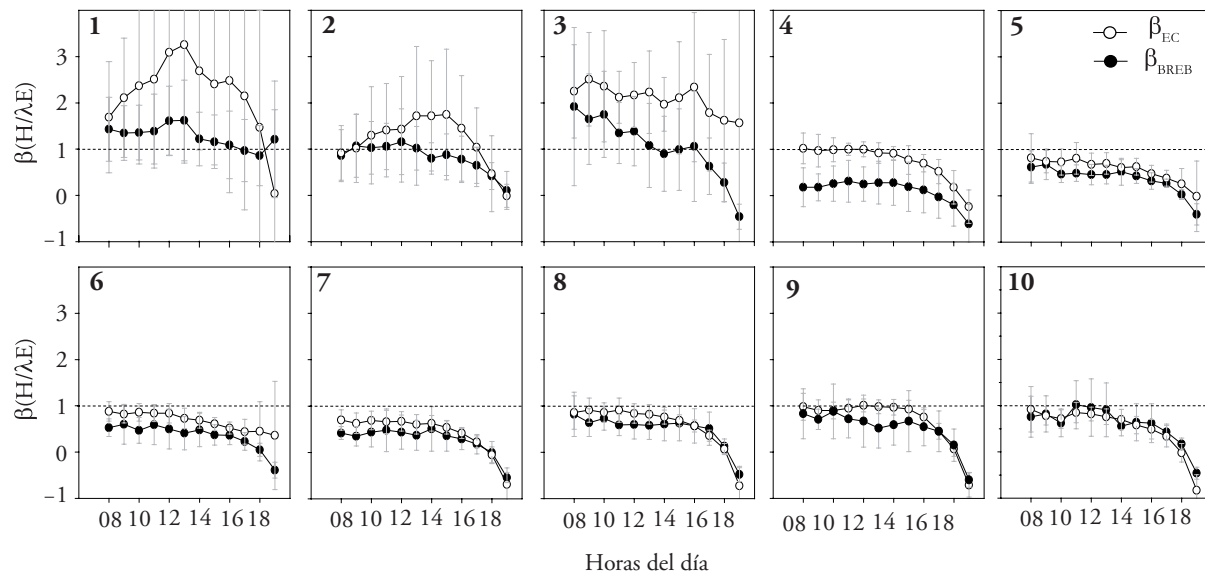


Figura 8. Promedio horario semanal de la relación β ($H/\lambda E$) estimada con los sistemas BREB y EC.
Figure 8. Weekly hourly average of the β ratio ($H/\lambda E$) estimated with the BREB and EC systems.

constantes a lo largo del día con valores menores al atardecer. Los valores de β_{BREB} fueron menores que β_{EC} revelando para este equipo una mayor asignación de energía a λE (Barr *et al.*, 1994). Durante el periodo de referencia el valor promedio diurno de β_{BREB} fue 0.48 y 0.62 para β_{EC} . Al transformar estas cifras a reparto de la energía disponible, el sistema BREB asignaría 67.6 %, y EC 61.7 % a ET.

Comparación de los flujos EC y BREB una vez forzado el cierre

La correlación entre los flujos turbulentos de ambos sistemas de medición mostró niveles altos de ajuste (R^2 0.94 y 0.87, para λE y H), pero mayores diferencias en sus pendientes. Mientras que para el calor latente λE_{BREB} presentó valores superiores a λE_{EC} (101.3 Wm^{-2} y 95.7 Wm^{-2}), en los flujos de calor sensible H_{EC} registró valores superiores que H_{BREB} (44.9 Wm^{-2} y 39.2 Wm^{-2}). En el periodo nocturno H_{EC} registró valores negativos menores que H_{BREB} (-33.90 y -26.50 Wm^{-2}) (Cuadro 2).

Para analizar el comportamiento temporal de las diferencias, los flujos turbulentos se compararon día a día, observándose que las diferencias estuvieron representadas por picos de flujo en λE_{BREB} en los días julianos del 172 al 182, 185 al 187 y 192 al 195. Los picos de λE fueron acompañados de disminuciones

de β_{EC} revelando para este sistema una mayor asignación de energía a λE (Barr *et al.*, 1994). During the period of reference the daytime average of β_{BREB} was 0.48, and 0.62 for β_{EC} . Once these figures are transformed to partition of available energy, BREB system would assign 67.6 % and EC 61.7 % to ET.

Comparison of the EC and BREB fluxes once the closure was forced

The correlation between the turbulent fluxes of both measurement systems showed high levels of adjustment (R^2 0.94 and 0.87, for λE and H), but greater differences in their slopes. While for the latent heat λE_{BREB} was higher than λE_{EC} (101.3 Wm^{-2} and 95.7 Wm^{-2}), in sensible heat fluxes H_{EC} recorded higher values than H_{BREB} (44.9 Wm^{-2} and 39.2 Wm^{-2}). In the night period H_{EC} recorded negative values lower than H_{BREB} (-33.90 and -26.50 Wm^{-2}) (Table 2).

To analyze the time behavior of differences, the turbulent fluxes were compared between them day by day, observing that the differences were represented by flux peaks in λE_{BREB} in the Julian days from 172 to 182, 185 to 187 and 192 to 195. The λE peaks were accompanied by decreases of the H flux. Gavilán and Berengena (2007) point out that under atmospheric conditions related to stability and

Cuadro 2. Promedio de los flujos de λE , H y estadísticos[†] R^2 , a, b, RMSE y I.A.**Table 2. Average of the fluxes λE , H and R^2 statistics[†], a, b, RMSE and I.A.**

Flujo	BREB	EC	RMSE	IA	R^2	b	a
λE (Wm^{-2})	101.3	95.7	33.4	0.974	0.94	0.83	12.2
H (Wm^{-2})	39.2	44.9	33.8	0.959	0.87	1.05	3.8

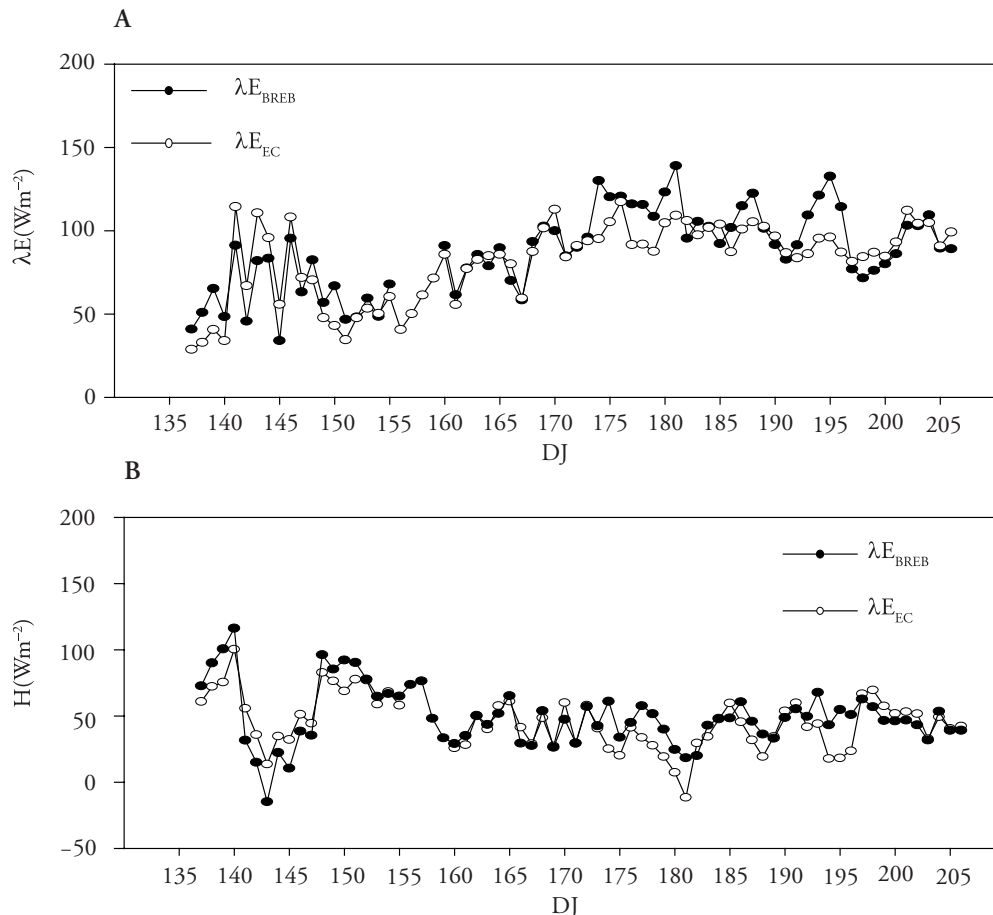
[†] $Y_{EC} = b_{BREB} + a$; BREB variable independiente y EC dependiente; R^2 : coeficiente de correlación; a: intersección; b: pendiente $\diamond Y_{EC} = b_{BREB} + a$; BREB independent variable, and EC dependent variable; R^2 : correlation coefficient; a: intersection; b: slope.

del flujo de H. Gavilán y Berengena (2007) señalan que en condiciones atmosféricas relacionadas con la estabilidad y la dirección predominante de los vientos, los sistemas BREB pueden sobreestimar de los flujos de λE , y por tanto subestimar H (Figura 9).

La coincidencia entre los dos periodos de valores máximos de λE_{BREB} y por tanto diferencias mayores con EC y una dirección predominante del viento (sur y a favor de las hileras) sugieren que la heterogeneidad interior del cultivo tuvo una influencia mayor

the prevailing direction of winds, BREB systems can produce overestimates of the λE fluxes, and therefore underestimates of H (Figure 9).

The coincidence between the two periods of λE_{BREB} with maximum values and therefore greater differences with EC and a prevailing wind direction (south and for rows) suggest that the internal heterogeneity of the crop had a greater influence to locate the mixing zone, and that in the BREB system the position of the arms above the plant cover is

**Figura 9. Valores promedio diarios de A) λE , y B) H estimados con los sistemas EC y BREB.****Figure 9. Daily mean values of A) λE , and B) H estimated with the EC and BREB systems.**

para localizar la zona de mezcla, y que en el sistema BREB la posición de los brazos encima de la cubierta vegetal es un factor crítico. Al respecto, Heilman *et al.* (1994) observaron que sobre un viñedo en espaldera el perfil de velocidad del viento y temperaturas cambiaba en función de la dirección del viento y lugar de muestreo (sobre o entre las hileras de plantas). Estos autores sugieren que existe mayor desarrollo de turbulencias (mezcla) en la parte alta del dosel cuando el viento sopla perpendicular a las hileras. También en viñedo, Weiss y Allen (1976) y Hicks (1973) señalan variaciones en intensidad de la turbulencia y del coeficiente de arrastre en la parte alta del dosel en función de la dirección del viento. Esta situación no se apreció en el sistema EC ya que el sensor se encontraba al doble o más de la altura de la vegetación, altura definida para la subcapa mixta (Cellier y Brunet, 1992) y donde el impacto de la heterogeneidad de la superficie en el desarrollo de la capa de mezcla es menor.

Evapotranspiración con el método EC y BREB

En el período experimental total la suma de ET_{BREB} fue 202 mm y de ET_{EC} 192 mm (174 mm sin forzamiento de cierre) (Cuadro 3). La diferencia entre los sistemas representó 5 %, considerado un nivel de ajuste diario adecuado. La mayoría de las comparaciones

critical. In this regard, Heilman *et al.* (1994) found that over a trellis vineyard the profile of wind speed and temperature changed depending on the wind direction and sampling location (over or between the rows of plants). These authors suggest that there is further development of turbulence (mixture) in the upper canopy where the wind is perpendicular to the rows. Also in vineyards, Weiss and Allen (1976) and Hicks (1973) indicate variations in intensity of the turbulence and the coefficient of dragging in the upper canopy depending on the wind direction. This situation was not observed in the EC system as the sensor was twice or more of the vegetation height, a height level defined for the mixed sublayer (Cellier and Brunet, 1992) and where the impact of the surface heterogeneity on the development of the mixed layer was lower.

Evapotranspiration with the EC and BREB methods

In the entire experimental period the sum of ET_{BREB} was 202 mm and ET_{EC} 192 mm (174 mm without forced closure) (Table 3). The difference between the systems accounted for 5 %, considered an adequate level of daily adjustment. Most of the comparisons between these systems have shown slight overestimations of the BREB system in

Cuadro 3. Valores calculados de ET con los sistemas EC y BREB y K_c calculado.
Table 3. ET estimated values with the EC and BREB systems and K_c calculated.

Semana	ET_{EC} mm	ET_{BREB} mm	ET_{EC} mm d ⁻¹	ET_{BREB} mm d ⁻¹	Δ %	$K_{c_{EC}}$	$K_{c_{BREB}}$
1	15.13	14.98	2.16	2.14	-1 %	0.49	0.45
2	17.42	17.02	2.49	2.43	-2 %	0.66	0.59
3	10.16	12.20	2.03	2.44	17 %	0.29	0.36
4	8.65	8.54	2.88	2.85	-1 %	0.45	0.44
5	21.60	21.14	3.09	3.02	-2 %	0.63	0.61
6	24.24	27.82	3.46	3.97	13 %	0.54	0.62
7	25.10	27.04	3.59	3.86	7 %	0.53	0.57
8	23.43	24.93	3.35	3.56	6 %	0.48	0.51
9	21.81	24.78	3.12	3.54	12 %	0.44	0.49
10	24.12	23.30	3.45	3.33	-4 %	0.52	0.50
Total	191.7	201.8					
Promedio (mm d ⁻¹)	2.96	3.12					
Desviación estándar	0.82	0.87					

entre estos sistemas ha mostrado ligeras sobreestimaciones del sistema BREB en relación a EC (Brotzge y Crawford, 2003; Zhang *et al.*, 2007), y en viña Li *et al.* (2008) reportan diferencias de 6 % a favor de BREB.

Coefficiente de cultivo

Los valores de K_c (ET/E_{To}) fueron similares en ambos sistemas y captan los máximos desde el suelo de la evaporación del agua de las lluvias al inicio del experimento o de las aplicaciones de riego posteriores (Figura 10). Los valores de K_c al inicio estuvieron entre 0.2 y 0.3 para EC y BREB y ambos sistemas capturan el comportamiento ascendente del K_c ligado al desarrollo fenológico del cultivo. Posteriormente y luego de la lluvia-riego del DOY 165, los valores de $K_{c\text{ medio}}$ fueron 0.52 para BREB y 0.49 para EC. Los dos sistemas pronosticaron valores similares de K_c y las diferencias estuvieron representadas por los picos de λE estimados con BREB. El sistema EC registró con mayor estabilidad el comportamiento del K_c y una sensibilidad mayor sobre la disponibilidad real de humedad en el suelo y controles internos de los flujos por las plantas. Es importante señalar que ambos equipos estimaron valores de K_c inferiores a los publicados para *Vitis vinifera* en FAO56 (Allen *et al.*, 1998); sin embargo, las estimaciones coinciden con valores locales evaluados con lisimetría en viñedo con riego (Montoro *et al.*, 2008).

CONCLUSIONES

Ambos equipos estimaron montos similares de ET diaria y acumulada y permitieron pronosticar el

relation to EC (Brotzge and Crawford, 2003, Zhang *et al.*, 2007), and in vineyard Li *et al.* (2008) report differences of 6 % in favor of BREB.

Crop coefficient

The values of K_c (ET/E_{To}) were similar in both systems and captured the maximum products from the soil rainwater evaporation at the beginning of the experiment or when the subsequent irrigation applications were conducted (Figure 10). The values of K_c at the beginning were between 0.2 and 0.3 for EC and BREB. Both systems capture the rising trend performance of K_c linked to the crop phenological development. Subsequently, and after the rainwatering of DOY 165, the $K_{c\text{ medio}}$ values were 0.52 for BREB and 0.49 for EC. The two systems predicted similar K_c values and the differences were represented by λE peaks estimated with BREB. The EC system recorded the K_c behavior with greater stability, and higher sensitivity over the actual availability of soil moisture and internal controls of plant fluxes. It is important to note that both systems estimated K_c values lower than those reported for *Vitis vinifera* in FAO56 (Allen *et al.*, 1998), but the estimates are consistent with the local values assessed with lysimeter in vineyard with irrigation (Montoro *et al.*, 2008).

CONCLUSIONS

Both systems estimated similar amounts of daily and cumulative ET and allowed to predict a change of the crop coefficient during the season.

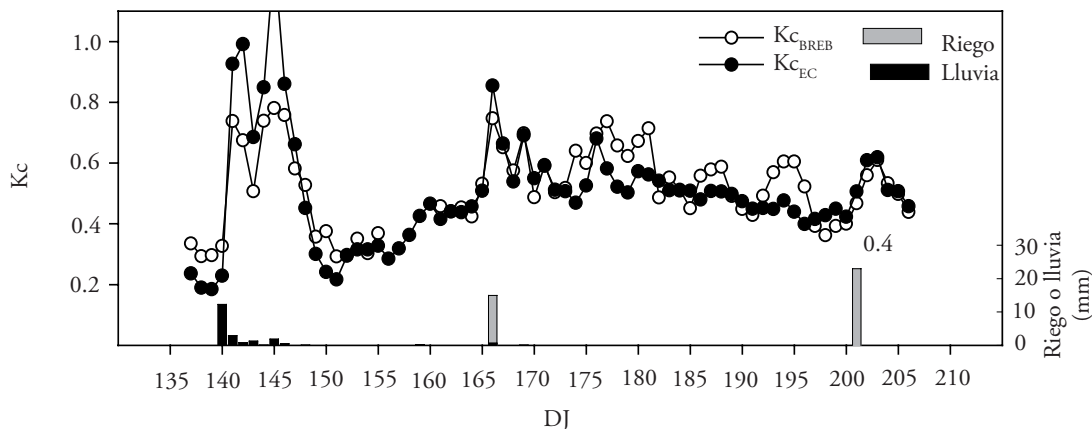


Figura 10. Evolución del K_c calculado a partir de los flujos de λE de EC y BREB.
Figure 10. Evolution of K_c estimated in λE fluxes of EC and BREB.

cambio del coeficiente de cultivo durante la temporada. El método EC en viñedo ha requerido forzamiento del cierre de balance de energía. Una vez forzado el cierre, el sistema BREB sobreestimó ligeramente los flujos del sistema EC ya que presentó máximos mayores de diferencias en períodos específicos. Estas diferencias se podrían explicar por la ubicación cercana a la cubierta vegetal del brazo inferior del sistema BREB que, bajo determinadas condiciones de dirección de viento y estabilidad atmosférica, puede requerir altura y colocación de los sensores sobre la cubierta vegetal en una posición diferente. El análisis y comparación efectuados incrementa la fiabilidad de los resultados de ET obtenidos por el sistema EC con forzamiento de cierre a lo largo del ciclo de crecimiento, y permite calcular el coeficiente de cultivo de la viña. La evolución temporal de dicho coeficiente responde al desarrollo del cultivo y es sensible a riegos o lluvias en los que se produce una evaporación mayor desde la capa de suelo desnudo. La evaluación del flujo de calor en el suelo en tres sectores independientes dentro del marco de plantación permite señalar que, aunque los patrones de iluminación y sombreado influyen en el comportamiento de G a escala horaria en cada sector, los valores integrados muestran diferencias pequeñas entre zonas y se obtienen valores representativos promedio, así como una relación G/R_n estable para el periodo diurno y nocturno.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo se realizó en el marco de los proyectos: EBHE (Cod. CGL2008-04047, Ministerio de Ciencia e Innovación de España). SIRIUS (Cod. FP7-SPACE-2010-1, Research Executive Agency Collaborative Project in the Seventh Framework Program of the European Union).

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper N° 56, Rome, Italy. 300 p.
- Barr, A. G., K. M. King, T. J. Gillespie, G. Denhartog, and H. H. Neumann. 1994. A comparison of Bowen-ratio and eddy-correlation sensible and latent-heat flux measurements above deciduous forest. *Boundary-Layer Meteorol.* 71:21-41.
- Blanken, P. D., 1998. Turbulent flux measurements above and below the overstory of a boreal Aspen forest. *Boundary-Layer Meteorol.* 89:109-140.
- Berengena, J., and P. Gavilán. 2005. Reference evapotranspiration estimation in a highly advective semiarid environment. *J. Irrigation Drainage Eng.* 131: 147-163.
- Broetzge, J. A., and K. C. Crawford. 2003. Examination of the surface energy budget: A comparison of eddy correlation and Bowen ratio measurement systems. *J. Hydrometeorol.* 4: 160-178.
- Campos, I., C. M. U. Neale, A. Calera, C. Balbontín, and J. González-Piqueras, 2010. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agric. Water Manag.* In Press, Corrected Proof.
- Cellier, P., and Y. Brunet. 1992. Flux-gradient relationships above tall plant canopies. *Agric. For. Meteorol.* 58:93-117.
- Dugas, W. A., L. J. Fritschen, L. W. Gay, A. A. Held, A. D. Matthias, D. C. Reicosky, P. Steduto, and J. L. Steiner. 1991. Bowen-ratio, eddy-correlation, and portable chamber measurements of sensible and latent-heat flux over irrigated spring wheat. *Agric. For. Meteorol.* 56:1-20.
- Foken, T., F. Wimmer, M. Mauder, C. Thomas, and C. Liebethal. 2006. Some aspects of the energy balance closure problem. *Atmos. Chem. Phys.* 6: 4395-4402.

—End of the English version—



- Gavilán, P., and J. Berengena. 2007. Accuracy of the Bowen ratio-energy balance method for measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. *Irrigation Sci.* 25:127-140.
- Heilman, J. L., C. L. Brittin, and C. M. U. Neale. 1989. Fetch requirements for Bowen ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. *Agric. For. Meteorol.* 44: 261-273.
- Heilman, J. L., K. J. McInnes, M. J. Savage, R. W. Gesch, and R. J. Lascano. 1994. Soil and canopy energy balances in a west Texas vineyard. *Agric. For. Meteorol.* 71: 99-114.
- Hicks, B. B. 1973. Eddy fluxes over a vineyard. *Agric. Meteorol.* 12: 203-215.
- Li, S., S. Kang, L. Zhang, F. Li, Z. Zhu, and B. Zhang. 2008. A comparison of three methods for determining vineyard evapotranspiration in the arid desert region of northwest China. *Hydrological Processes* 22: 4554-4564.
- Mahrt, L. 2000. Surface heterogeneity and vertical structure of the boundary layer. *Boundary-Layer Meteorol.* 96: 33-62.
- Mauder, M., T. Foken, R. Clement, J. A. Elbers, W. Eugster, T. Grünwald, B. Heusinkveld, and O. Kolle. 2008. Quality control of CarboEurope flux data-Part 2: Inter-comparison of eddy-covariance software. *Biogeosciences* 5: 451-462.
- Monteith, J., and M. Unsworth. 2007. *Principles of Environmental Physics*. Academic Press. Burlington, USA. 435 p.
- Montoro, A., R. López Urrea, F. Mañas, P. López Fuster, and E. Fereres. 2008. Evapotranspiration of grapevines measured by a weighing lysimeter in La Mancha, Spain. *Acta Hort. (ISHS)* 792:459-466.
- Ohmura, A. 1982. Objective criteria for rejecting data for Bowen ratio flux calculations. *J. Appl. Meteorol.* 21: 595-598.
- Oliver, H. R., and K. J. Sene. 1992. Energy and water balances of developing vines. *Agric. For. Meteorol.* 61: 167-185.
- Payero, J. O., C. M. U. Neale, and J. L. Wright. 2005. Estimating soil heat flux for alfalfa and clipped tall fescue grass. *Appl. Eng. Agric.* 21:401-409.
- Prueger, J. H., J. L. Hatfield, J. K. Aase, and J. L. Pikul, Jr. 1997. Bowen-ratio comparisons with lysimeter evapotranspiration. *Agron. J.* 89:730-736.
- Rosenberg, N. J., B. L. Blad, and S. B. Verma. 1983. *Microclimate: The Biological Environment*. Wiley, New York. 495 p.
- Schuepp, P. H., M. Y. Leclerc, J. I. MacPherson, and R. L. Desjardins. 1990. Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation. *Boundary-Layer Meteorol.* 50:355-373.
- Soegaard, H., N. O. Jensen, E. Boegh, C. B. Hasager, K. Schelde, and A. Thomsen. 2003. Carbon dioxide exchange over agricultural landscape using eddy correlation and footprint modelling. *Agric. For. Meteorol.* 114:153-173.
- Stannard, D. I. 1997. A theoretically based determination of Bowen-ratio fetch requirements. *Boundary-Layer Meteorol.* 83:375-406.
- Todd, R. W., S. R. Evett, and T. A. Howell. 2000. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. *Agric. For. Meteorol.* 103: 335-348.
- Twine, T. E., W. P. Kustas, J. M. Norman, D. R. Cook, P. R. Houser, T. P. Meyers, J. H. Prueger, P. J. Starks, and M. L. Wesely. 2000. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agric. For. Meteorol.* 103:279-300.
- Unland, H. E., P. R. Houser, W. J. Shuttleworth, and Z.-L. Yang. 1996. Surface flux measurement and modeling at a semi-arid Sonoran Desert site. *Agric. For. Meteorol.* 82: 119-153.
- Webb, E. K., G. I. Pearman, and R. Leuning. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water-vapor transfer. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.* 106:85-100.
- Weiss, A., and L. H. Allen Jr. 1976. Vertical and horizontal air flow above rows of a vineyard. *Agric. Meteorol.* 17:433-452.
- Willmott, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin Am. Meteorol. Soc.* 63:1309-1313.
- Wolf, A., N. Saliendra, K. Akshalov, D. A. Johnson, and E. Laca. 2008. Effects of different eddy covariance correction schemes on energy balance closure and comparisons with the modified Bowen ratio system. *Agric. For. Meteorol.* 148:942-952.
- Zhang, B. Z., S. Z. Kang, L. Zhang, T. S. Du, S. E. Li, and X. Y. Yang. 2007. Estimation of seasonal crop water consumption in a vineyard using Bowen ratio-energy balance method. *Hydrological Processes* 21: 3635-3641.