

Evaporación a Equilibrio en el Pasto Ryegrass en la Agricultura de Riego de las Zonas Áridas

Alejandro Zermeño González*, Héctor Vázquez Hernández, Raúl Rodríguez García,
UAAAN, Departamento de Riego y Drenaje, Saltillo, Coah., México. *autor de correspondencia

Juan Munguia López, Luis Ibarra Jiménez y Rosario Quezada Marín
CIQA, Departamento de Agroplásticos, Saltillo, Coah., México,

Javier Lozano del Río

UAAAN, Depto. de Fitomejoramiento, Sección de Cereales, Saltillo, Coah., México.

Abstract. *Evaporation to equilibrium on ryegrass on irrigated agriculture of arid lands.* The objective of this research was to calibrate the equilibrium evaporation approach (LE_{equ}) to determine ryegrass actual evapotranspiration (LE) in the irrigated agriculture of arid lands. Its easy implementation and low cost are the major advantages of this approach for determining the rate of evapotranspiration of crops in real time, as compared to other micrometeorological methods. The calibration consists in obtaining the advection factor (a), which is multiplied by the equilibrium evaporation to obtain actual evapotranspiration. The advection factor depends on the weather conditions of the region, and on the magnitude of local advection. For different time segments was obtained from the relation $a = LE/LE_{equ}$. LE was calculated by the energy balance equation, while LE_{equ} from measurements of net radiation and soil heat flux at the surface. The results of this research showed that net radiation (Rn), actual latent heat flux (LE), and latent heat flux at equilibrium (LE_{equ}) follow the same trend as the incident solar radiation (Rsw), and that there is a very close relation between actual evapotranspiration and equilibrium evaporation. When sensible heat flux (H) is negative, indicating local advection, LE is greater than LE_{equ} and the average advection factor is 1.51. In contrast, when H is positive (no local advection) LE is less than LE_{equ} and the average advection factor is 1.00. A direct relation between the increase of sensible heat flux from the atmosphere to grass canopy (negative H), and the increase on the advection factor was observed. It was also observed a possible relation between the increase of wind speed and the decrease of the advection factor. No relation was detected between wind direction and the advection factor.

Key words: Equilibrium evaporation, local advection, energy balance, evapotranspiration.

Resumen. El objetivo de esta investigación fue calibrar el enfoque de la evaporación a equilibrio (LE_{equ}) para determinar la evapotranspiración real (LE) del pasto Rye Grass en la agricultura de riego de las zonas áridas. La ventaja de este método es su fácil implementación y bajo costo para determinar la tasa de evapotranspiración de cultivos en tiempo real, comparado con otros métodos micrometeorológicos. La calibración consiste en obtener el factor de advección (a), el cual se multiplica por la evaporación a equilibrio para generar la evapotranspiración real. El factor de advección depende de las características climáticas de la zona y de la magnitud de la advección local. Para varios segmentos de tiempo se obtuvo a partir de la relación $a = LE/LE_{equ}$. LE se calculó con la ecuación del balance de energía, mientras que LE_{equ} se obtuvo a partir de mediciones de radiación neta y flujo de calor en la superficie del suelo. Los resultados de esta investigación muestran que la radiación neta (Rn), el flujo de calor latente real (LE) y el flujo de calor latente a equilibrio (LE_{equ}) siguen la misma tendencia que la radiación solar incidente (Rsw), y que existe una estrecha relación entre la tasa de evapotranspiración real y la evapotranspiración a equilibrio. Cuando el flujo de calor sensible (H) es negativo, lo que indica la presencia de advección local, LE es mayor que LE_{equ} y el factor de advección promedio es 1.51. En contraste, cuando H es positivo (sin advección local), LE es menor que LE_{equ} y el factor de advección promedio es 1.00. Se observó una relación directa entre el incremento del flujo de calor sensible de la atmósfera hacia el dosel del pasto (H negativo) y el incremento del factor de advección. Los resultados obtenidos también muestran una posible relación entre el incremento de la velocidad del viento y el decremento del factor de advección. No se observó relación entre la dirección del viento y el factor de advección.

Palabras clave: Evaporación a equilibrio, advección local, balance de energía, evapotranspiración.

Introducción

El agua es el recurso más importante en la agricultura de riego de las zonas áridas. En México las zonas áridas ocupan una superficie de 95 millones de hectáreas que equivale al 48% del territorio nacional (CONAZA, 1994); en estas zonas la precipitación promedio anual es menor de 400 mm y el riego es indispensable para incrementar la productividad de los cultivos. Para mejorar la eficiencia del uso del agua en la agricultura de riego de estas zonas, es necesario medir o estimar el consumo diario de agua de los cultivos (evapotranspiración), para determinar el momento oportuno de riego y la lámina de agua por aplicar.

La evapotranspiración (ET) de cultivos se puede estimar con ecuaciones climatológicas empíricas que estiman una ET potencial o de referencia, la cual se debe modificar por un coeficiente de cultivo (Allen *et al.*, 1994; Wright, 1996). Sin embargo, estas ecuaciones proporcionan una estimación de la evapotranspiración promedio diaria mensual y tienen poca aplicación para la programación de la irrigación en tiempo real (Hanson, 1996; Lascano *et al.*, 1996).

Los métodos micrometeorológicos como el de la relación Bowen y el de la covarianza eddy (Verma *et al.*, 1986; Baldochi *et al.*, 1988, Zermeño-González, 2001), tienen varias ventajas sobre los métodos anteriores, ya que permiten evaluar la ET diaria en tiempo real y son muy precisos si se utilizan adecuadamente (Zermeño-González, 2001; Jiyane y Zermeño-González, 2003). La limitación principal de estos métodos es el alto costo del equipo, lo que limita su utilidad a los productores agrícolas (Jiyane y Zermeño-González, 2003)

El método de la evaporación a equilibrio (LE_{equ}) se puede utilizar para determinar la evapotranspiración diaria en tiempo real de los cultivos, principalmente los de cobertura total (Rana *et al.*, 1997) ya que el equipo que se requiere es sencillo y de bajo costo, comparado con los micrometeorológicos, pues sólo es necesario realizar mediciones de radiación neta y flujo de calor en la superficie del suelo, lo que facilita su uso por los productores agrícolas. LE_{equ} es esencialmente el primer término de la ecuación de Penman-Monteith y representa la tasa de ET que ocurre cuando la conductancia de la capa frontera entre la superficie vegetal y la atmósfera es muy pequeña, de tal forma que el intercambio de materia y energía es muy limitado (Jones, 1992; Howel *et al.*, 1998).

La evaporación a equilibrio se ha utilizado principalmente para condiciones de zonas húmedas (Priestley y Taylor, 1972). Según (Zermeño-González y Hipps, 1997) para las zonas áridas generalmente se observa un transporte horizontal de déficit de presión de

vapor proveniente de las áreas circundantes hacia las zonas regadas, por lo que es necesario corregir la de evaporación a equilibrio por un factor de advección, que es función de la magnitud del transporte horizontal de déficit de presión de vapor.

El objetivo de esta investigación fue obtener el factor de advección a partir de la evaporación a equilibrio, para determinar la ET del pasto Rye Grass en la agricultura de riego de las zonas áridas del norte de México, y evaluar las condiciones climáticas que afectan este factor.

Materiales y Métodos

El trabajo se realizó durante el ciclo primavera - verano de 2002 en el rancho El Padrino, ejido la Providencia municipio de Saltillo, Coahuila, ubicado a 25° 14' 07" N y 101° 10' 25" O y una altitud de 1749 m. Se estableció el pasto forrajero Rye Grass, variedad Tetraploide, anual, en una superficie de 20 ha (Figura 1), sembrado al boleto, del 15 al 30 de agosto de 2001, con una densidad de siembra de 40 kg/ha. El sistema de riego fue un *side-roll*, con el

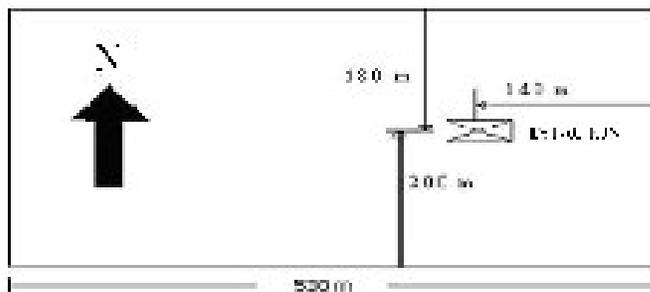


Figura 1. representación esquemática del área de estudio y ubicación de la estación con los sensores e instrumentos de medición.

que se aplicaron riegos de 8 mm h⁻¹ por 8 h, a un intervalo de riegos de siete días durante el desarrollo de la investigación.

Instrumentación y mediciones

La evaporación a equilibrio (LE_{equ}) se determinó con la siguiente ecuación (Zermeño-González y Hipps, 1997; Jiyane y Zermeño-González, 2003):

$$LE_{equ} = \frac{S}{S + \gamma} (Rn - G) \quad (1)$$

Donde: Rn es la radiación neta (W m⁻²), G es el flujo de calor en la superficie del suelo (W m⁻²), S es la pendiente de la curva de presión de vapor a saturación vs temperatura (Pa K⁻¹) y γ es la constante psicrométrica (Pa K⁻¹), la cual

se determinó con la siguiente relación:

$$\gamma = \frac{P * C_p}{0.622 L} \quad (2)$$

Donde: P es la presión barométrica de la localidad (Pa), C_p es la capacidad calorífica del aire ($J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) y L es el calor de vaporización del agua ($J \text{ kg}^{-1}$)

Para obtener la tasa de evapotranspiración real del cultivo (LE), en función de la evaporación a equilibrio, es necesario conocer el factor de advección (a):

$$LE = \alpha * LE_{equ} \quad (3)$$

De tal forma que el factor de advección se obtiene despejando a de la ecuación (3):

$$\alpha = \frac{LE}{LE_{equ}} \quad (4)$$

La tasa de evapotranspiración real del cultivo se determinó con la ecuación del balance de energía sobre una superficie vegetal, sin considerar los términos menores:

$$LE = (R_n - G) - H \quad (5)$$

Donde: H es el flujo de calor sensible ($W \text{ m}^{-2}$) y se determino por el método de la covarianza eddy (Zermeño-González y Hipps, 1997):

$$H = \rho C_p \overline{w'T'_a} \quad (6)$$

Donde $w'T'_a$ es la covarianza entre la velocidad vertical del viento y la temperatura del aire, \bar{n} es la densidad del aire (kg m^{-3}), C_p a la capacidad calorífica del aire ($J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$). La barra horizontal superior indican un promedio de un intervalo de tiempo y las primas denotan desviaciones de la media. La velocidad vertical del viento (w) se midió con un anemómetro sónico tridimensional (Figura 2), modelo CSAT3, Campbell Scientific, inc., Logan, UT; en la parte media del anemómetro sónico se colocó un termopar de chromel-constantan de $12.7 \mu\text{m}$ de diámetro para medir la temperatura del aire (T_a). Todos los sensores de colocaron a una altura de un metro sobre el dosel del pasto. Las mediciones se realizaron a una frecuencia de 5 Hz para obtener promedios continuos de 20 min durante el desarrollo de la investigación, utilizando un datalogger modelo 23X (Campbell, Sci, Inc, Logan, UT).

R_n se midió con un radiómetro neto (modelo Q-7.1 Radiation and Energy Balance Systems, Inc.) colocado a

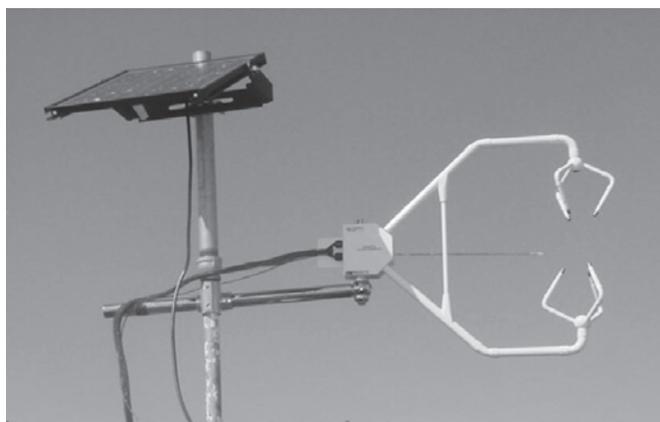


Figura 2. Anemómetro sónico tridimensional para medir flujo de calor sensible.

una altura de un metro sobre el dosel del pasto. G se obtuvo al medir el flujo de calor a 8 cm bajo la superficie del suelo; se usaron dos transductores de calor (modelo HFT3, Campbell Scientific inc., Logan UT), a los cuales se les sumó el cambio en la energía almacenada en el estrato de 8 cm de suelo por cambios de temperatura. También se midió la radiación solar Incidente (R_{sw}) en $W \text{ m}^{-2}$ con un pyronómetro de silicón (modelo LI200x, LI-COR, Inc), la velocidad y dirección del viento con una veleta de viento y un anemómetro de tres tazas (Wind sentry modelo 03101-5 R.M. Young). Todos los sensores se colocaron en el lado este de campo (Figura 1) para detectar los vientos provenientes del Oeste (perpendicular a la orientación del anemómetro sónico tridimensional), y con un datalogger (CR7X, Campbell Sci., Inc.), se programaron para registrar datos a una frecuencia de dos segundos para generar promedios continuos de 20 min. durante el tiempo de la investigación.

Procesamiento de datos

Para el análisis de datos, únicamente se consideraron días sin lluvias y con vientos dominantes de la dirección Oeste, con un ángulo de 180° a 360° para asegurar que el anemómetro sónico tridimensional registraba el paso libre del viento y no al que pudiera modificarse por las superficies de los alrededores. Bajo estas condiciones se calcularon los flujos integrados (con los promedios de 20 min) de R_n , G, LE y LE_{equ} para segmentos de tiempo, con la dirección del viento previamente establecida, utilizando la siguiente ecuación:

$$Flujo(MJm^{-2}) = 1X10^{-6} * \int_{t_1}^{t_2} flujo(Wm^{-2})dt \quad (7)$$

Ya integrados los flujos de LE y LE_{equ} con la ecuación 4 se obtuvieron los factores de advección (a) para los diferentes segmentos de tiempo.

Resultados y Discusión

Componentes del balance de energía y la evaporación a equilibrio

Las relaciones entre los componentes del balance de energía y el flujo de calor latente a equilibrio (evaporación a equilibrio) se discuten únicamente para los días del año 108 y 125, por limitaciones de espacio y porque resultados similares se observaron en el resto de los días analizados. En las figuras 3 y 4 se muestra el patrón diario de los componentes del balance de energía (Rn, G, LE, H), en promedios de 20 min, además de la radiación solar total incidente (Rsw) y la evaporación a equilibrio (LE_{equ}). LE y LE_{equ} manifiestan las mismas tendencias de variación que Rsw y Rn, pues muestran los máximos valores de las 13:00 a las 14:00 h. Esto indica que la tasa de evapotranspiración real del pasto (LE) podría obtenerse a partir de la evaporación a equilibrio y un factor de ajuste. Cuando el flujo de calor sensible (H) es negativo, LE_{equ} es menor que LE (Figura 3), y cuando H es positivo, LE_{equ} es aproximadamente igual o ligeramente mayor que LE (Figura 4), lo cual sugiere que el factor de advección (a) será mayor que la unidad cuando H es negativo, y aproximadamente igual a la unidad o menor cuando H es positivo. Los valores negativos de H indican la presencia de advección local y un incremento de la tasa de evapotranspiración del pasto; resultados similares fueron reportados por Zermeño-González y Hipps (1997), Jiyane y Zermeño-González (2003), Rosenberg (1969).

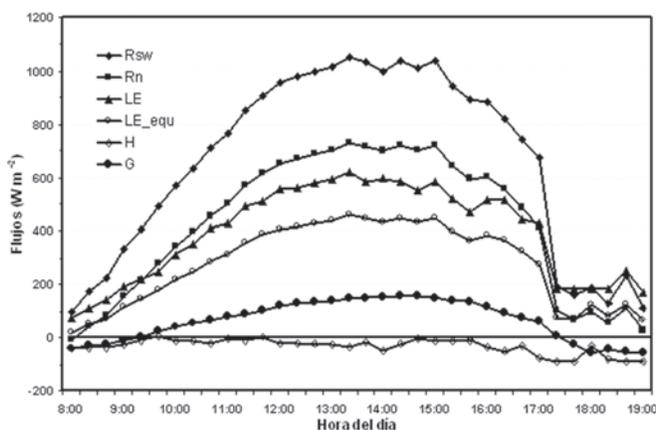


Figura 3. Patrón diario de los componentes del balance de energía (Rn, LE, H, G), radiación solar incidente (Rsw) y evaporación a equilibrio (LE_{equ}) para el día 108 del año.

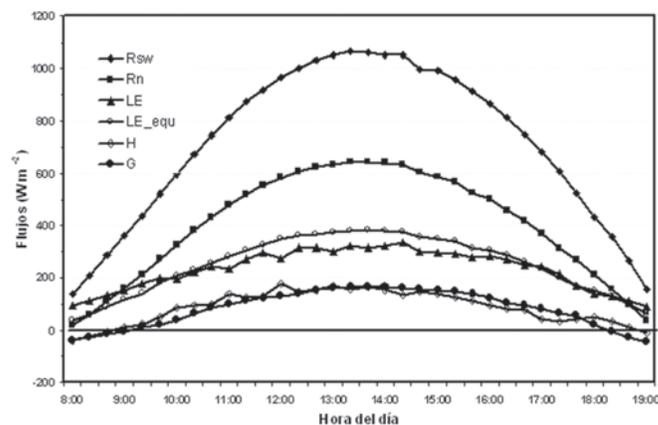


Figura 4. Patrón diario de los componentes del balance de energía (Rn, LE, H, G), radiación solar incidente (Rsw) y evaporación a equilibrio (LE_{equ}) para el día 125 del año.

condiciones de dirección de viento establecidas.

Cuadro 1. Valores integrados de flujo de calor sensible (H), flujo e calor latente (LE), flujo de calor latente a equilibrio (LE_{equ}) y factor de advección(a) para los segmentos de tiempo correspondientes.

Día	Segmento de tiempo	H (MJ/m ²)	LE (MJ/m ²)	LE _{equ} (MJ/m ²)	α
105	9:00-12:00	-0.62	3.03	1.68	1.80
105	13:40-18:00	-0.15	4.69	3.37	1.39
107	9:00-13:00	-0.07	6.54	4.87	1.34
108	9:00-16:00	-0.45	12.76	9.45	1.35
109	10:00-16:00	-0.38	10.96	8.25	1.33
126	15:40-18:00	-0.19	3.34	2.53	1.32
130	15:00-18:00	-0.65	1.91	0.97	1.97
132	15:00-18:00	-0.28	1.54	0.99	1.56
				Media =	1.51
				C.V (%) =	16.55
121	9:00-17:00	1.62	9.17	8.78	1.05
122	9:00-14:00	0.99	6.06	5.56	1.09
123	9:00-18:00	1.70	9.67	9.06	1.07
124	8:40-13:20	1.80	4.02	4.56	0.88
125	9:00-18:00	3.57	8.67	9.60	0.90
126	9:00-14:00	2.36	4.52	5.33	0.85
127	9:00-12:00	0.75	2.89	2.80	1.03
131	9:00-14:00	1.22	5.98	5.45	1.10
132	9:00-14:00	1.21	5.50	5.20	1.06
				Media =	1.00
				C.V (%) =	9.76

Factor de advección

En el cuadro 1 se muestran los valores integrados de H, LE, LE_{equ} y el valor correspondiente del coeficiente de advección (a) para los segmentos de tiempo con las

Cuando H es negativo la evapotranspiración real del pasto es mayor que la evaporación a equilibrio, y el factor de advección promedio es 1.51, de modo que la evapotranspiración real del pasto a partir de la evaporación a equilibrio se obtiene como: $LE = 1.51 \cdot LE_{equ}$; Jiyane y

Zermeño-González (2003) reportan un coeficiente de advección de 1.247 para el cultivo de maíz en la Región Lagunera, en condiciones de advección local ($H < 0$); para frijol fue de 1.30 en las mismas condiciones (Leite *et al.*, 1990).

En ausencia de advección local ($H > 0$) y el factor de advección promedio es 1.00, lo cual significa que la tasa de evapotranspiración real del pasto es igual a la tasa de evaporación a equilibrio.

Relación entre el factor de advección y el flujo de calor sensible

La relación entre el flujo de calor sensible y el factor de advección se presenta en la figura 5. El factor de advección aumenta a medida que el flujo de calor sensible es negativamente mayor, y disminuye a medida que H es positivamente mayor. El flujo de calor sensible entre el dosel del pasto y el aire depende de la diferencia de temperaturas. Cuando la temperatura del dosel es menor que la del aire, H es negativo y la dirección del flujo es del aire hacia el dosel, lo cual indica la presencia de advección local y que el factor de advección es mayor. Si la temperatura del dosel es mayor que la del aire, H es positivo y la dirección del flujo es del dosel hacia el aire, lo cual indica ausencia de advección local y que el factor de advección es menor.

Relación del factor de advección y la velocidad del viento

Para las condiciones de la investigación, parece ser que no existe relación entre la velocidad del viento y el factor de advección (Figura 6); sin embargo, la tendencia media de la dispersión indica que el factor de advección tiene a disminuir a medida que aumenta la velocidad del viento.

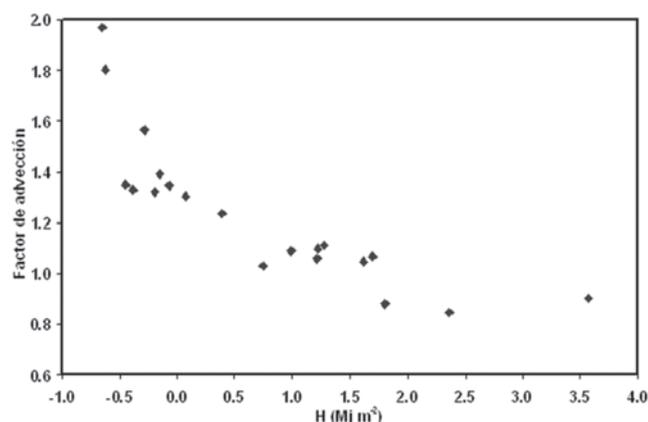


Figura 5. Diagrama de dispersión entre el factor de advección y el flujo de calor sensible (H).

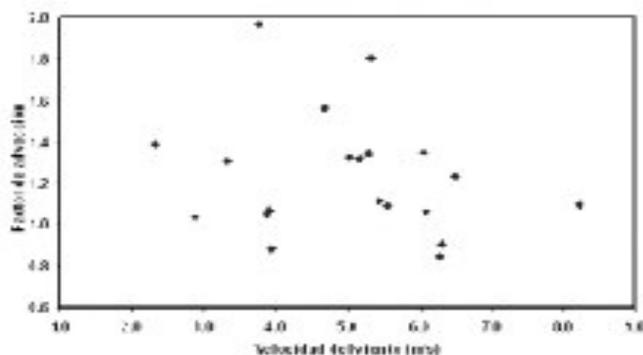


Figura 6. Diagrama de dispersión entre el factor de advección y la velocidad del viento.

Relación del factor de advección y la dirección del viento

No existe relación entre el factor de advección y la dirección del viento (Figura 7). Esto sugiere que las características de las superficies circunvecinas al área de estudio eran similares, de tal forma que la advección local fue igual en todas direcciones.

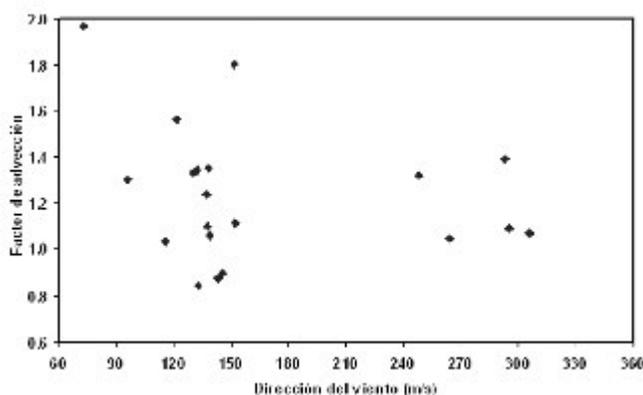


Figura 7. Diagrama de dispersión entre el factor de advección y la dirección del viento.

Conclusiones

La radiación neta (R_n), flujo de calor latente real (LE) y el flujo de calor latente a equilibrio (LE_{equ}) siguen la misma tendencia que la radiación solar incidente (R_{sw}).

Cuando el flujo de calor sensible (H) es negativo, LE es mayor que LE_{equ} . En contraste, cuando H es positivo, LE es menor que LE_{equ} . Esto indica que cuando LE es mayor que LE_{equ} , el factor de advección (a) es mayor que la unidad; y cuando LE es menor que LE_{equ} , a es menor que la unidad.

El valor promedio del factor de advección obtenido fue 1.51 para condiciones de presencia de advección local (H negativo) y 1.00 para condiciones de ausencia de

advección local (H positivo).

Se observó una relación directa entre el incremento del flujo de calor sensible de la atmósfera hacia el dosel del pasto (H negativo) y el incremento del factor de advección. Los resultados también muestran una relación entre la tendencia media del incremento de la velocidad del viento y el decremento del factor de advección.

No se observó relación entre la dirección del viento y el factor de advección, lo cual sugiere que las características de las superficies circundantes al pasto fueron similares, de tal forma que la advección local fue igual en todas direcciones.

Los resultados de esta investigación sugieren que el enfoque de la evapotranspiración a equilibrio puede adaptarse a los cultivos de cobertura total en la agricultura de riego de las zonas áridas, para lo cual debe considerarse la ocurrencia de advección local.

Literatura Citada

- Allen, R.G., Smith, M., Perrier, A. and Pereira, L.S., 1994. An update for the calculation of the reference evapotranspiration. *ICID Bulletin* 43(2): 1-34.
- Baldocchi, D.D., B.B. Hicks y T.P. Meyers. 1988. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology* 69: 1331-1340.
- Hanson, B.R., 1996. Errors in using historical reference crop evapotranspiration for irrigation scheduling. *Proceedings of ASAE International Conference on Evapotranspiration and irrigation Scheduling*. San Antonio, TX, p. 220-224.
- Lascano, R.J., Baumhardt, R.L., Hicks, S.K., Evett, S.R. and Heilman, J.L., 1996. Daily measurement and calculation of crop water use. *Proceedings of ASAE International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*. San Antonio, TX, p. 225-230.
- Leite Maysa Lima, Gilberto C. Sedyama, Dirceu Teixeira Coelho y Hélio Alves Vieira. 1990. Determinação da evapotranspiração de equilíbrio numa superfície cultivada com Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), em duas densidades de Plantio. *Revista Ceres* 37: 99-110.
- Medeiros, T.A., Sentelhas P. C., de Lima N.R. 2003. Reference evapotranspiration estimated by Penman-Monteith equation, Lysimetric measures and empirical equations in Paraipaba, State of Ceará, Brazil. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.23, n.1, p.31-40.
- Priestley, C.H.B., y R.J. Taylor 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review* 100:81-92.
- Rana, G., N. Katerji, M. Mastrorilli, M. El Moujabber y N. Brisson. 1997. Validation of a model of actual evapotranspiration for water stressed soybeans. *Agricultural and Forest Meteorology* 86: 215-224.
- Rosenberg, N.J. 1969. Advective contribution of energy utilized in evapotranspiration by Alfalfa in the East Central Great Plains. *Agric. Meteorol.* 6: 179-184.
- Verma, S.B., D.D. Baldocchi, D.E. Anderson, D.R. Matt R.J. Clement. 1986. Eddy fluxes of CO₂, water vapor and sensible heat over a deciduous forest. *Boundary-Layer Meteorol.* 36: 71-91.
- Jiyane, J. y Zermeño-González, A. 2003. Aplicación del enfoque de evapotranspiración a equilibrio en la agricultura de riego de las zonas áridas. *Agrociencia*, 37: 553-563.
- Wriggitt, J.L., 1996. Derivation of alfalfa and grass reference evapotranspiration. *Proceedings of ASAE International Conference on Evapotranspiration and irrigation Scheduling*. San Antonio, TX, p. 133-140.
- Zermeño-González, A. y L. E. Hipps. 1997. Downwind evolution of surface fluxes over a vegetated surface during local advection of heat and saturation deficit. *Journal Of Hydrology* 192: 189-210.
- Zermeño González, A. 2001. Métodos micrometeorológicos para medir flujos de calor y vapor de agua entre los cultivos y la atmósfera. XIII Semana Internacional de Agronomía. 5-7 de septiembre. Gómez Palacios, Durango, México, p. 53-57.