

EVAPORACIÓN EN SUELO DESNUDO EN CONDICIONES DE ALTA DEMANDA ATMOSFÉRICA

Alfonso CALERA, Andrés CUESTA, Alfonso DOMÍNGUEZ, José GONZÁLEZ
y Concha FABEIRO

Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Castilla La Mancha. 02071. Albacete

RESUMEN

La evaporación desde suelo desnudo tiene una gran importancia por la gran cantidad de superficie que se encuentra en esta condición a lo largo del tiempo en regiones semiáridas. En este trabajo se analiza la evaporación del suelo desnudo en sus dos fases. Para ello se utilizan datos obtenidos en una experiencia en campo, en condiciones de alta demanda evaporativa atmosférica y con diferentes contenidos de humedad del suelo. Se ha procedido a la determinación de la duración de la primera fase por varios métodos. Destaca, entre ellos, el cambio de la reflectividad del suelo durante el secado gradual. Los resultados muestran que la duración de la primera fase es inferior o cercana a un día, dependiendo del agua aportada. El análisis de la evaporación en la segunda fase muestra una fuerte dependencia del contenido en agua del suelo.

Palabras clave: Desortividad, Evaporación, Reflectividad, Suelo Desnudo.

ABSTRACT

Evaporation from bare soil is of great importance due to the extensive land surfaces subject to this condition in semiarid regions. In this paper evaporation from bare soil is analysed in its two stages. For this purpose, data has been obtained from fieldwork carried out in areas where high atmospheric evaporative conditions and different soil moisture contents were present. The length of the first stage of evaporation has then been determined using several methods, the most important being the change in reflectivity during a gradual drying out process. The results show that the length of the first stage is less than or nearly a day, depending on the irrigation water. Analysis of the second stage of evaporation shows a high dependence on soil water content.

Key words: Bare Soil, Desorptivity, Evaporation, Reflectance.

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento preciso del balance entre el agua aportada por precipitación o riego a un suelo y la evapotranspiración es de gran importancia, tanto por las importantes repercusiones en los modelos climáticos como para estimar la recarga en capas profundas que se puede producir.

En regiones semiáridas se cifra numéricamente el porcentaje de suelo desnudo entre el 50-60 % del total, de media a lo largo de un año. Esta inmensa superficie de suelo desnudo juega un papel fundamental en los flujos de evaporación a la atmósfera y recarga en el suelo, procesos en los que se distribuye la precipitación caída sobre ella. Su conocimiento y estimación empiezan a aparecer como elementos básicos en el balance que permita la gestión sostenible de los recursos hídricos en las diferentes escalas espaciales de orden práctico: parcela, acuífero, subcuenca, cuenca hidrográfica, etc.

El proceso de evaporación en suelo desnudo tiene lugar principalmente en dos fases:

- **Fase de velocidad constante (constant rate stage)**, durante la cual el grado de evaporación depende esencialmente del aporte de energía y de la demanda evaporativa de la atmósfera.
- **Fase de velocidad decreciente (falling rate stage)**, durante la cual el grado de evaporación no está tan controlado por las condiciones meteorológicas, pero sí por las características del suelo.

Observaciones de varios investigadores (IDSO *et al.*, 1979; BLACK *et al.*, 1969) señalan que, en la primera fase, la evaporación es aproximadamente el 90% de la evapotranspiración potencial E_{tp} . Asimismo muestran que la evaporación acumulada durante la segunda fase es aproximadamente proporcional a la raíz cuadrada del tiempo para un suelo y potencial de evaporación dado. Esto también ha sido observado por otros (SPARROW, 1981).

La evaporación acumulada durante un tiempo t se puede estimar en la forma:

$$E_{cum} = \int_0^{t_1} 0.9 E_{tp} dt + Sd \sqrt{t-t_1} \text{ cuando } t > t_1. \quad (1)$$

donde Sd es una constante empírica llamada desortividad para un suelo dado, que depende de las características del suelo y del contenido en agua del suelo, t_1 es el tiempo al cual termina la primera fase (comienzo de la segunda), y t es el tiempo desde que comienza la evaporación. Varios autores señalan que el paso de la primera fase de secado a la segunda se puede identificar por el cambio en el albedo (JACKSON *et al.*, 1976).

Es frecuente (BONSU, 1997) el análisis de la evaporación en condiciones de laboratorio. Sin embargo, en el presente artículo se describe la experiencia y se analizan los resultados de la evaporación de un suelo desnudo en condiciones de campo, con diferente contenido inicial de humedad y bajo condiciones de alta demanda evaporativa de la atmósfera.

Se ha prestado especial atención a la determinación de la duración de la primera fase de evaporación, dado que la evaporación en la segunda fase depende del contenido en agua al final de la primera fase. Así, la estimación de la duración de la primera fase se ha realizado por cuatro procedimientos entre los que destaca la medida de la reflectividad del suelo y el cambio que en ella se produce al secarse gradualmente la superficie.

2. MATERIALES

2.1. Localización y duración.

La experiencia se ha llevado a cabo durante los meses de julio y agosto de 2000 en la finca experimental "Casa Alcocer", Tarazona de la Mancha (Albacete) sobre suelo desnudo de una parcela

cuyo cultivo anterior había sido cebada de invierno. La explotación puede considerarse como típica de la zona, pues los cultivos principales son cereales de secano (cebada, trigo y avena) y viña (en vaso y en espaldera con riego localizado).

2.2. Instalaciones.

Para la realización del experimento se utilizaron microlisímetros de 30 cm x 30 cm de ancho y 20 cm de profundidad colocados por parejas, a los que se aportó distintas cantidades de agua mediante riego por aspersión en un solo riego simultáneo. Debajo de cada microlisímetro se colocó una cubeta con el fin de recoger el agua de drenaje. La cantidad de agua aportada a cada microlisímetro, medida mediante pesada, se muestra en la Tabla 1, tanto en milímetros de agua como en volumen de agua por volumen de suelo. Es de notar que durante el resto de la experiencia no ha existido ningún otro aporte de agua en forma de precipitación o riego.

Tabla 1. CANTIDADES DE AGUA APORTADAS A LOS MICROLISÍMETROS EN UN SOLO RIEGO

Dosis riego	SRE1	SRE2	RE1	RE2	RW1	RW2	SRW1	SRW2
(mm)	4.16	9.16	25.18	30.18	17.27	21.12	25.29	21.75
cm ³ / cm ³	0.024	0.053	0.147	0.174	0.105	0.128	0.151	0.130

2.3. Textura del suelo utilizado.

Todos los microlisímetros utilizados durante la experiencia contenían un suelo de condiciones idénticas. Dicho suelo fue extraído y colocado en el interior de los microlisímetros sin alterar la estructura de éste, cortando en bloques el suelo existente. El suelo ha sido calificado como Franco-Arenoso (74% arena, 8% limo y 18% arcilla).

2.4. Medida de la evaporación.

La evaporación se midió por diferencia de peso de los microlisímetros. Se pueden distinguir dos periodos diferentes en cuanto a la toma de datos durante la experiencia. El primer período es correspondiente al primer día, durante el cual, una vez finalizado el riego, se procedió a pesar y a realizar medidas radiométricas de cada uno de los microlisímetros en intervalos de una hora. A continuación, durante los tres primeros días se pesaron diariamente cada uno de los microlisímetros, siempre a la misma hora. A partir del tercer día se pesaron cada dos o tres días, siempre a la misma hora, con una báscula de sensibilidad 10 g. y peso máximo 60 kg. El peso de dos microlisímetros testigo, a los que no se les había aportado agua de riego, ha permanecido constante a lo largo de toda la experiencia

2.5. Radiometría.

Para la detección de cambios en la reflectividad del suelo según la humedad de la superficie del suelo se ha dispuesto de un radiómetro GER modelo 3700 de espectro continuo. Este sensor registra niveles de radiancia en el rango de 0.3 a 2.5 μm . La obtención de la reflectividad se ha realizado mediante el cociente de la radiancia reflejada por un panel de Spectralon (reflectividad 99%) y la radiancia del suelo en estudio.

2.6. Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0).

La demanda evaporativa de la atmósfera se ha estimado mediante la evapotranspiración de referencia ET_0 (ALLEN *et al*, 1998). Los datos meteorológicos en intervalos de diez minutos se han utilizado para calcular, también mediante FAO Penman-Monteith, la evapotranspiración acumulada horaria durante el primer día de la experiencia, y así poder comparar dicho valor con la evaporación acumulada horaria que obtuvimos con los microlisímetros.

En la figura 1 se representan los valores de ET_0 a lo largo de los 30 días de duración de la experiencia. En ella se observa la alta demanda evaporativa atmosférica durante el periodo de ensayo, con un valor medio de 6.9 mm/día.

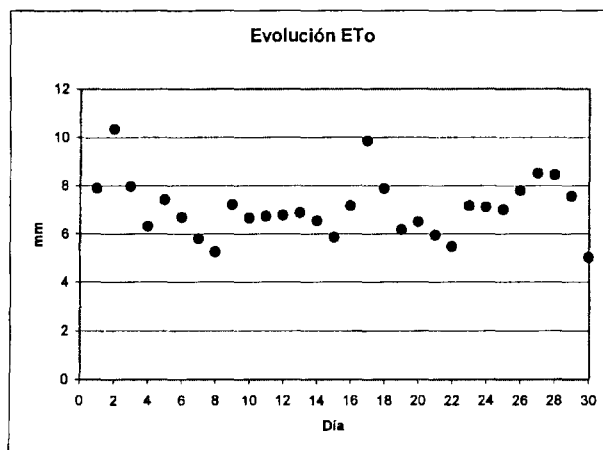


Fig. 1. Evapotranspiración de referencia diaria, calculada por el método FAO Penman-Monteith durante la duración de la experiencia

3. MÉTODOS Y RESULTADOS

3.1. Determinación de la duración de la primera fase de evaporación

La determinación de la duración de la fase 1 se ha realizado por cuatro métodos, lo que nos permite comparar posteriormente los resultados:

- Análisis de regresión sobre los datos de evaporación acumulada diaria.
- Variación de la reflectividad de la superficie de suelo desnudo.
- Ecuación de Gardner y Hillel (GARDNER y HILLEL, 1962) para la determinación de la duración de la fase 1 de evaporación.
- Comparación de la evaporación horaria acumulada con la correspondiente a la evapotranspiración de referencia.

3.1.a. Determinación de la duración de la fase 1 mediante análisis de regresión sobre los datos de evaporación acumulada diaria

Una vez que comienza la segunda fase de evaporación, la evaporación acumulada es linealmente dependiente de la raíz cuadrada del tiempo (ROSE, 1968; BLACK *et al.*, 1969; JALOTA y PRIHAR, 1986).

La representación gráfica de la evaporación acumulada frente a la raíz cuadrada del tiempo (figura 2) muestra la relación lineal que existe entre estos dos parámetros, tal y como indica el elevado coeficiente de correlación (r^2) de la recta de regresión. La pendiente de la recta de ajuste representa la desortividad (Sd) (PARLANGE *et al.*, 1985). Este resultado muestra un buen acuerdo con la ecuación 1, para la segunda fase.

Es de notar que el agua evaporada en las primeras 24 horas supone un porcentaje del total del agua evaporada que va del 24 al 29 % para los microlisímetros SRW, RW y RE, y del 35 al 50 % para los microlisímetros SRE, cantidades que dan idea de la importancia de la primera fase.

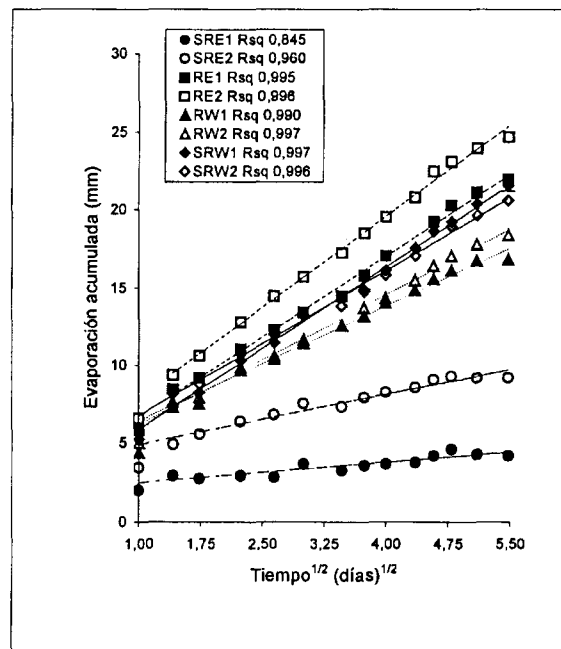


Fig. 2. Evapotranspiración acumulada de cada uno de los microlisímetros en función de la raíz cuadrada del tiempo

Pues bien, para estimar la duración de la fase 1 de evaporación se ha representado la evapotranspiración frente a la raíz cuadrada del tiempo, incluyendo en un primer paso todos los días de la

experiencia, después incluyendo todos los días menos el primero, a continuación incluyendo todos los días menos el primero y el segundo, y así sucesivamente. En cada una de las representaciones calculamos el coeficiente de correlación de la línea de tendencia y establecemos una comparación entre los distintos coeficientes de correlación correspondientes a cada una de las distintas rectas de las distintas representaciones. La duración de la primera fase será aproximadamente igual al número de días que se ha tenido que eliminar desde el principio de la experiencia para obtener el coeficiente de correlación más alto.

Los coeficientes de correlación han resultado, en todos los casos, lo suficientemente altos para demostrar la relación lineal entre los parámetros representados en la gráfica, y además estos coeficientes varían muy poco pese a que vamos eliminando puntos, lo que analíticamente nos dice que en todos los casos estamos en fase 2 de evaporación, es decir, que a partir del primer día tras el riego el suelo se encuentra en segunda fase de evaporación.

3.1.b. Determinación de la duración de la fase 1 mediante estudio de la variación de la reflectividad de la superficie de suelo desnudo

Como se ha comentado anteriormente el cambio en el albedo del suelo, que señala la finalización de la fase 1, está ligado al secado gradual de la capa superficial del suelo desnudo.

La obtención de la curva que expresa la reflectividad en función de la longitud de onda para cada hora ha permitido analizar cómo cambia gradualmente la reflectividad en el tiempo, en cada una de las superficies de los microlisímetros. En la figura 3 se representa a modo de ejemplo esto mismo para un microlisímetro.

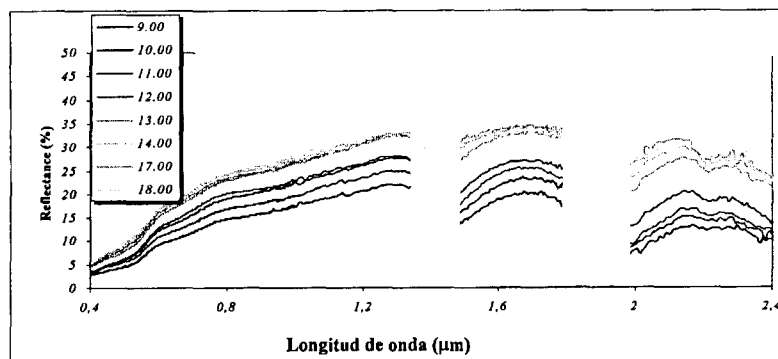


Fig. 3. Cambio de la reflectividad del suelo desnudo a diferentes horas, dependiendo del secado gradual de la superficie del suelo

El criterio seguido a la hora de establecer el final de la fase 1 de evaporación en cada una de las parcelas es que no se produzca una variación apreciable en la reflectividad con el tiempo, lo que responde a que no exista variación en el contenido en agua superficial.

En la tabla 2 se muestra la hora de finalización de la fase 1 de evaporación según las medidas radiométricas realizadas en este ensayo.

Estos resultados nos indican que la finalización de la fase 1 de evaporación se produce en todos los casos dentro del primer día y que además, cuanto mayor es la cantidad de agua aportada al suelo, más tarde se produce el cambio de fase.

Tabla 2. HORA (CIVIL) DE LA FINALIZACIÓN DE LA FASE 1 SEGÚN EL MODELO DE LA EVA-POTRANSPIRACIÓN ACUMULADA Y SEGÚN LOS DATOS DE RADIOMETRÍA

Parcela	Hora de finalización de la fase 1 (ET_0 acumulada)	Hora de finalización de la fase 1 (radiometría)
SRE1	12:00 - 13:00	14:00
SRE2	14:00 - 17:00	14:00
RE1	18:00	18:00
RE2	18:00	18:00
RW1	14:00 - 17:00	17:00
RW2	17:00 - 18:00	14:00
SRW1	14:00 - 17:00	18:00
SRW2	17:00 - 18:00	17:00

3.1.c. Determinación de la duración de la fase 1 a partir de la fórmula de Gardner y Hillel

GARDNER y HILLEL (1962) formularon la siguiente ecuación para estimar el tiempo de duración de la fase 1 de evaporación:

$$t_1 = \frac{(w_s - w_1) G_s H_s}{e_p} \quad (4)$$

donde w_s es el contenido en agua del suelo al principio de la fase 1 de evaporación y w_1 es el contenido en agua del suelo al final de la fase 1 de evaporación. G_s es la densidad aparente del suelo, H_s es la profundidad del suelo y e_p es la evaporación potencial (ET_{pan}) que es la evaporación que se produce en una cubeta de referencia en estas condiciones atmosféricas. A partir de esta expresión se puede llegar a estimar la duración de la fase 1 de evaporación. En esta ecuación, el término que desconocemos es w_1 . Pues bien, lo que se ha hecho es sustituir en el término w_1 de la ecuación el valor del contenido en agua del suelo al final de cada día que obtenemos mediante pesada de los microlisímetros, ya que conocemos el peso de los microlisímetros cuando estaban secos. De esta forma obtenemos diversos tiempos. Estos tiempos son muy parecidos, pese a que los valores de w_1 aparezcan alejados en el tiempo de medida, con lo cual obtenemos un tiempo aproximado de final de la fase 1 de evaporación.

Los resultados obtenidos con este procedimiento indican que la duración de la fase 1 es inferior o cercana a 1 día y que su duración aumenta con el contenido en agua de los microlisímetros al inicio de la experiencia.

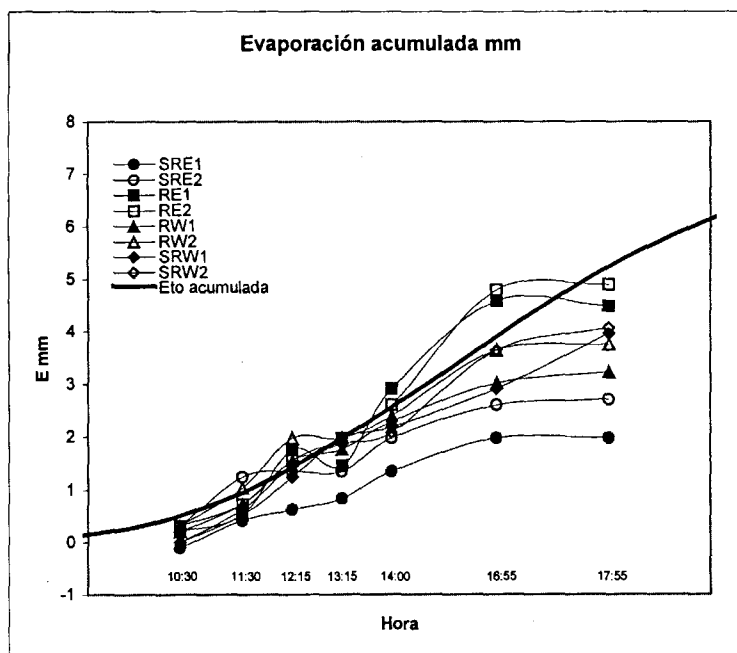


Fig. 4. Evolución de la evaporación acumulada en cada microlisímetro comparada con la evapotranspiración de referencia acumulada durante el primer día

3.1.d. Determinación de la duración de la fase 1 a partir de la comparación de la evaporación horaria acumulada con la correspondiente evapotranspiración de referencia

Durante el primer día también se realizaron medidas lisimétricas con intervalos de una hora entre cada medida. Se ha representado (figura 4) la evolución del agua evaporada acumulada de los diferentes microlisímetros y la evolución de la evapotranspiración acumulada estimada desde el cálculo de la evapotranspiración de referencia para cada hora a lo largo del primer día. Tratamos de deducir de la gráfica el momento en que la evaporación acumulada de cada microlisímetro deja de seguir el ritmo marcado por la evapotranspiración de referencia, lo que determina el momento de finalización de la fase 1, en la que la demanda evaporativa atmosférica es el elemento fundamental.

En esta curva (figura 4) se muestra cómo la evaporación acumulada en las primeras horas en los microlisímetros sigue la evolución de la evapotranspiración de referencia acumulada sobre el mismo intervalo temporal. Se aprecia cómo los microlisímetros que menos agua han recibido se separan más rápidamente de la evolución de la ET_0 acumulada, siguiendo el orden inverso a la precipitación recibida.

En la Tabla 2 vienen recogidos los intervalos de tiempo en los cuales finaliza la fase 1 de evaporación, que han sido determinados interpretando la gráfica anterior de forma cualitativa.

3.2. Evaporación en la segunda fase

Como se ha visto anteriormente (figura 1) la segunda fase de evaporación sigue la ecuación 1, de tal forma que el parámetro desortividad es la pendiente de la curva.

Tal y como se muestra en la figura 5, la relación de la desortividad con el contenido en agua al inicio de la segunda fase se describe mediante una ecuación lineal, tomando la desortividad valores que oscilan entre 0.5 y 4, lo que indica una fuerte dependencia del contenido en agua de la evaporación del suelo desnudo en la fase 2. Los datos del contenido en agua del suelo han sido tomados considerando la duración de la primera fase de evaporación de 1 día en todos los microlisímetros.

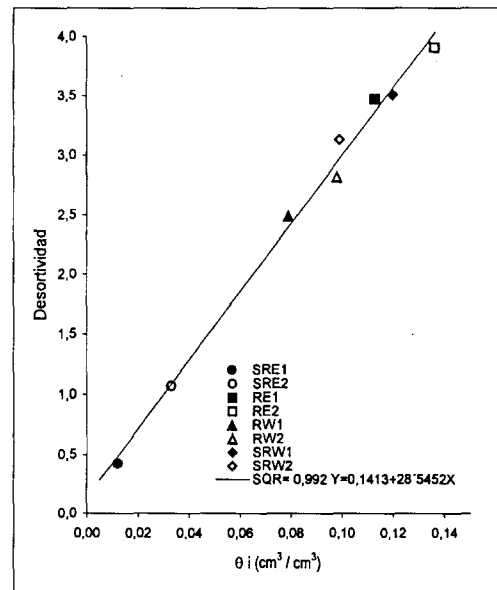


Fig. 5. Representación de la desortividad en función del contenido en agua al inicio de la fase 2 para los 8 microlisímetros en estudio

5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En la determinación de la duración de la fase 1 se han utilizado cuatro procedimientos. Podemos apreciar que todos los resultados nos llevan a unos intervalos de tiempo similares para la finalización de la primera fase de evaporación. Se puede decir que este tiempo ha sido de un día o inferior en todos los casos y según todos los métodos utilizados. Es de notar que es posible que en

algún momento en algunos casos, especialmente durante las primeras horas de la mañana del inicio del segundo día puede suceder una regresión de la fase 2 a la fase 1, propiciada por un ascenso en el perfil de humedad favorecido por el enfriamiento nocturno.

A su vez se ve claramente que la duración de esta primera fase es dependiente del contenido en agua que existe en el suelo tras el aporte de agua al principio de la experiencia, dadas unas mismas condiciones atmosféricas..

La utilización de medidas radiométricas muestra que la reflectividad cambia según el secado gradual del suelo, estabilizándose cuando la capa superficial está seca. Este procedimiento permite, pues, estimar de forma precisa el momento a partir del cual la superficie del suelo se ha secado, ya que, a partir de entonces la reflectividad del suelo se mantiene aproximadamente constante. La precisión de este método depende del intervalo temporal de las diferentes medidas. Asimismo, aunque no se presenta el análisis en profundidad en este trabajo, el comportamiento de la reflectividad en las diferentes bandas, visible, infrarrojo cercano y medio, sigue similar comportamiento.

La estabilización de la reflectividad del suelo es un indicador del final de la primera fase, ya que aproximadamente en el mismo tiempo, se observa que la evaporación desde el suelo deja de seguir la evolución de la evapotranspiración de referencia; dicha evapotranspiración de referencia expresa la demanda evaporativa de la atmósfera.

En cuanto al comportamiento del agua en el suelo durante la fase 2 de evaporación se encuentra que la evaporación acumulada muestra una relación lineal con la raíz cuadrada del tiempo. La desortividad del suelo, que es la pendiente de la curva de ajuste, depende fuertemente de la cantidad de agua en éste al inicio de esta fase de evaporación.

Así pues, la cantidad de agua en el suelo se configura como parámetro fundamental para estimar la evaporación desde esta superficie, ya que influye en la duración de la primera fase, y, a través del contenido en agua al final de ésta, muy fuertemente en la segunda, ya que la desortividad depende en gran medida de ese contenido en agua.

En este sentido, se han de abordar trabajos posteriores para analizar la evaporación del suelo desnudo en distintas condiciones atmosféricas, tales como las que se dan en otras épocas del año

Este trabajo parece sugerir líneas prometedoras en la determinación de la evaporación de suelo desnudo como combinación de información procedentes de sensores en el espectro solar de muy alta frecuencia temporal, junto con sensores de microondas, que permitan determinar el contenido en humedad de la primera capa del suelo.

6. AGRADECIMIENTOS

La medida de las reflectividades ha sido posible gracias a la colaboración del Dr. Joaquín Meliá y su equipo del Departamento de Termodinámica de la Universidad de Valencia.

7. BIBLIOGRAFIA

- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D. y SMITH, M. (1998): "*Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*". UN-FAO, Rome, Italy.
- BLACK, T.A., GARDNER, W.R. y THURTELL, G.W. (1969): "The prediction of evaporation, drainage and soil water storage for a bare soil". *Soil Science Society of America Proceedings*, Vol. 33, pp. 655-660.
- BONSU, M. (1997): "Soil water management implications during the constant rate and the falling rate stages of soil evaporation". *Agricultural Water Management*, 33: 87-97.
- GARDNER, W.R. y HILLEL, D.I. (1962): "The relation of external evaporative conditions to the drying of soils". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 67, No. (11), pp. 4319-4325.
- IDSO, S.B., REGINATO, R.J. y JACKSON, R.D. (1979): "Calculation of evaporation during the three stages of soil drying". *Water Resources Research*, Vol. 15, No. (2), pp. 487-488.
- JACKSON, R.D., IDSO, S.B., y REGINATO, R.J. (1976): "Calculation of evaporation rates during the transition from energy-limiting to soil-limiting phases using albedo data". *Wash. Agric. Exp. Stn. Circ.*, No. 386, pp. 14.
- JALOTA, S.K. y PRIHAR, S.S. (1986): "Effects of atmospheric evaporativity, soil type and redistribution time on evaporation from bare soils". *Aust. J. Soil. Res.*, 25: 243-249.
- PARLANGE, J. Y., VAUCLIM, M., HAVERKAMP, R. y LISTLE, I. (1985): "The relationship between desorption and soil water diffusivity". *Soil Science*, 139: 458-461.
- ROSE, D.A. (1968): "Water movement in porous materials III: Evaporation of water from soil". *Br. J. Appl. Phys.*, 1: 1779-1791.
- SPARROW, G.J. (1981): "*Calculation of maximum ponding depth to dewater a clay tailing*", Technical Report MCC 290, CSIRO, Division of Mineral Chemistry, Melbourne, Australia, February, 1981.