

EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DEL ARROZ BAJO RIEGO POR ASPERSIÓN

Pérez Coveta, O.¹, Martínez Cob, A.^{1,2} (P)

RESUMEN

Este trabajo presenta un estudio realizado en el valle medio del Ebro (terrazas del curso bajo del río Gállego, en Zaragoza) durante 2001 y 2003 para determinar la evapotranspiración del arroz (ET_{arroz}) bajo riego por aspersión. La ET_{arroz} se determinó mediante el método de la renovación de la superficie aplicado a distintas alturas de medida. Se observaron diferencias significativas ($\alpha = 0,95$) entre los valores semihorarios de flujo de calor latente (LE) determinados en estas diferentes alturas. Aún así, estas diferencias no fueron sistemáticas y, a escala diaria, se redujeron a unos valores de incertidumbre similares a los de otros métodos micrometeorológicos (alrededor del 10 %). Los valores diarios de ET_{arroz} fueron relativamente altos como corresponde a un cultivo que necesita riego frecuente. Los valores de 2003, más caluroso, fueron algo mayores que los de 2001; así, los valores estacionales fueron de 799 mm en 2001 y 812 mm en 2003. El estudio de los coeficientes de cultivo (Kc) indicó que la fase inicial del cultivo fue muy larga, de unos 50-60 días, mientras que las fases de crecimiento, máximo desarrollo y final fueron de unos 20, 50 y 20-30 días; respectivamente. Los valores de Kc en la fase inicial fueron de alrededor de 0,90 con oscilaciones importantes causadas sobre todo por las precipitaciones. Durante la fase de máximo desarrollo, los valores de Kc fluctuaron entre 1,10 y 1,15 y durante la fase final, fueron de alrededor de 0,90. No obstante, los diversos problemas agronómicos que aún deben resolverse para este cultivo bajo este sistema de riego sugieren que estos valores de ET_{arroz} y Kc deben considerarse con precaución. Son convenientes campañas posteriores de medidas para confirmar o mejorar estos resultados.

SUMMARY

A study performed in the Middle Ebro River Valley (terraces of the lower Gállego River, at Zaragoza) during 2001 and 2003 to determine rice evapotranspiration (ET_{arroz}) under sprinkler irrigation is presented. The surface renewal method, applied to different measurement heights, was used to determine ET_{arroz} . Significant differences ($\alpha = 0.95$) among half-hour LE values at these different measurement heights were observed. Nevertheless, these differences were not systematic and, at a daily time step, reduced to uncertainty levels similar to other micrometeorological methods (around 10 %). Daily ET_{arroz} values were relatively high as expected for a crop requiring frequent irrigation applications. Values for 2003 were somehow higher than those for 2001 as 2003 was warmer. Seasonal values were 799 mm for 2001 and 812 mm for 2003. The study of the crop coefficients (Kc)

¹ Laboratorio Asociado de Agronomía y Medio Ambiente (DGA – CSIC). Departamento de Genética y Producción Vegetal (EEAD). Apartado 202, 50080 Zaragoza.

² Teléfono: 976 716086. Fax: 976 716145. Correo electrónico: macoan@eead.csic.es

showed that the initial crop stage was very long, about 50-60 days; growth, maximum development and final stages lasted about 20, 50 and 20-30 days, respectively. K_c values for the initial crop stage were about 0,90 although important fluctuations were observed due mainly to precipitations. During the maximum development crop stage, K_c values varied between 1.10 and 1.15. During the final crop stage, K_c values were about 0.90. However, several agronomic problems should still be solved to crop rice under sprinkler irrigation. Therefore, these ET_{arroz} and K_c values should be taken with caution. Further measurement campaigns are required to confirm or improve these results.

1. INTRODUCCIÓN

En España, la superficie de cultivo del arroz ha aumentado notablemente, de 47.900 ha en 1993 a 113.200 ha en 2001 (MAPA, 2001). Las zonas tradicionalmente productoras de arroz son Andalucía, Cataluña, Comunidad Valenciana y Extremadura. El resto de superficie arrocería española se localiza en Aragón, seguida de Navarra, Murcia y Castilla la Mancha. En los últimos años, la superficie cultivada en Aragón también ha aumentado, de 5.972 ha en 1993 a 14.171 ha en 2001 (DGA, 2001).

Tradicionalmente, el arroz se cultiva bajo riego por inundación, generalmente continuo. En Aragón, los suelos de cultivo tradicional del arroz son frecuentemente salino-sódicos, lo que favorece la dispersión y taponamiento de los poros y, por tanto, reduce las pérdidas de agua por percolación profunda. El uso de este tipo de suelos para otros cultivos es inviable por su estabilidad estructural baja, con tendencia al encharcamiento y anoxia. El auge del cultivo de arroz en los últimos años está causando su expansión a suelos más permeables lo que podría generar pérdidas por percolación profunda y salinización de suelos por ascenso de capas freáticas. Su cultivo en tierras de potencial agronómico alto, bajo riego por aspersión, podría ser una alternativa de interés frente a otros cultivos, como el maíz, por una reducción potencial de costes y una mayor rentabilidad. Además podría suponer un menor consumo de agua de riego regulada respecto al riego tradicional.

La cuantificación de la evapotranspiración del arroz es necesaria para mejorar el diseño y la programación del riego, conocer sus necesidades hídricas y realizar un uso más eficiente del agua. Varios trabajos han realizado medidas de la evapotranspiración del arroz bajo riego por inundación, a menudo sólo durante parte de su ciclo de cultivo (Dueñas y López, 1984; Harazono et al., 1998; Renaud et al., 1999; Sha y Edling, 2000; Shih et al., 1982; Tyagi et al., 2000). En España no existen datos medidos y los escasos estudios disponibles sólo se refieren a consumos totales de agua de riego regulada (Tolosa, 1990). El cultivo del arroz bajo riego por aspersión se ha realizado en EE.UU., Brasil, Australia e Italia. En España, ya se ha utilizado este sistema en Extremadura, donde se han cuantificado consumos medios de agua de riego de $9.600 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (Junta de Extremadura, 1999). Sin embargo, no existen trabajos que hayan realizado medidas de evapotranspiración bajo este sistema de riego, excepto el estudio preliminar de Pérez Coveta y Martínez Cob (2002).

En consecuencia, el presente trabajo tiene como objetivo presentar los resultados de dos campañas de determinación de la evapotranspiración del arroz bajo riego por aspersión en el clima semiárido del valle medio del Ebro. Asimismo, se presentan los resultados de la determinación de coeficientes de cultivo del arroz bajo este sistema de riego.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El trabajo se realizó durante las campañas de 2001, en una parcela experimental de 1 ha del Centro de Investigación y Tecnología Agraria (Gobierno de Aragón), y 2003, en una parcela experimental, también de 1 ha, de la Estación Experimental de Aula Dei (Consejo Superior de Investigaciones Científicas), situada a unos 2 Km al noreste de la anterior. Ambas parcelas se localizan en las terrazas del río Gállego, cerca de su desembocadura al

río Ebro, en el término municipal de Zaragoza. Sus coordenadas geográficas son 41°43' de latitud N y 0°49' de longitud O y la altitud es de 225 m. La precipitación media anual en la zona es de unos 330 mm (Faci et al., 1994) y los suelos de las dos parcelas se definen como Typic Xerofluvent.

En 2001, la parcela se sembró el 18 de mayo con 4 variedades (Guadiamar, Ganao, Goliat, Balilla x Sollana) en bandas este-oeste y se cosechó el 24 de octubre. Se realizaron 45 riegos a lo largo del ciclo (intensidad media de 15,8 mm riego⁻¹). En 2003, la parcela se sembró el 28 de abril con la variedad Guadiamar y se cosechó el 29 de septiembre. Se realizaron 57 riegos a lo largo del ciclo (intensidad media de 13,9 mm riego⁻¹).

La evapotranspiración semihoraria del arroz a lo largo de su ciclo de cultivo se determinó mediante la ecuación del balance de energía (Allen et al., 1996):

$$LE = Rn - G - H \quad (1)$$

donde: LE , flujo de calor latente; Rn , radiación neta; G , flujo de calor en el suelo; y H , flujo de calor sensible (valores medios semihorarios, todos expresados en $W m^{-2}$). Para obtener la evapotranspiración del arroz (ET_{arroz}), expresada en términos de altura de agua (mm), LE se dividió por el calor latente de vaporización. Los valores semihorarios de ET_{arroz} se sumaron para obtener valores diarios de esta variable.

La radiación neta se midió con dos radiómetros netos (marca Radiation and Energy Balance Systems, modelos Q-6 en 2001 y Q-7 en 2003). G se midió con dos placas de flujo de calor (marca Hukseflux Termal Sensors, modelo $HFP001$), enterradas a 0,08 m de profundidad, y cuatro termopares (marca Campbell, modelo $TCAV$), a 0,03 y 0,06 m de profundidad. Las lecturas de las placas se corrigieron en función de los cambios de temperatura del suelo según describen Allen et al. (1996). Todas las lecturas de Rn y G se tomaron cada 10 s y se promediaron cada 30 minutos.

Por su parte, H se determinó mediante el método de renovación de la superficie (Spano et al., 1997, 2000), el cual se basa en la existencia de unas estructuras coherentes que describen las fluctuaciones de alta frecuencia de temperatura del aire (Gao et al., 1989). Estas estructuras se caracterizan por dos parámetros, la amplitud (a) y el intervalo de tiempo ($l+s$) entre dos amplitudes consecutivas. Los valores semihorarios de H se obtuvieron según la expresión (Spano et al., 1997, 2000):

$$H = \alpha_{SR} c_p \rho_a \frac{a}{l+s} z \quad (2)$$

donde: c_p , calor específico del aire, $1.013 J Kg^{-1} °C^{-1}$; ρ_a , densidad del aire, $1.194 g m^{-3}$; z , altura de medida de la temperatura del aire; α_{SR} , factor de ponderación cuyo valor es 1,0 cuando las medidas de temperatura se realizan muy por encima de la cubierta vegetal en cultivos de poca altura (Spano et al., 1997).

En 2001, las lecturas de temperatura se realizaron con cuatro termopares de hilo fino de cromo-constantán, de 76 μm de diámetro (marca Campbell Scientific, modelo $TCBR-3$), colocados a 1,3, 1,7, 2,1 y 2,5 m de la superficie del suelo. En 2003, se utilizaron tres termopares $TCBR-3$ que se colocaron inicialmente a 0,3, 0,6 y 0,9 m de la superficie del suelo. Estas alturas se subieron a medida que el cultivo fue creciendo, manteniendo una distancia mínima de 0,3 m entre la altura de medida más baja y la parte superior de la cubierta vegetal. Al final del ciclo de cultivo, los termopares se encontraban a 1,0, 1,4 y 1,7 m de la superficie del suelo.

En ambos años, las lecturas de temperatura del aire se realizaron cada 0,75 s; cada 30 minutos se determinaron los momentos 2, 3 y 5 de las diferencias de temperatura entre lecturas consecutivas; a partir de estos momentos, los parámetros a y $l+s$ se calcularon

según describe Van Atta (1977). Por tanto, para cada altura de medida y cada periodo semihorario se calcularon 4 valores de H en 2001 y 3 en 2003 mediante la ecuación (2) y los correspondientes de LE aplicando la ecuación (1).

Para determinar los coeficientes de cultivo (K_c) del arroz bajo riego por aspersión se calcularon valores diarios de evapotranspiración de referencia (ET_0) con el método FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998). Para ello se utilizaron los datos meteorológicos medios diarios registrados en una estación agrometeorológica automática situada en una parcela de festuca (1,2 ha) adyacente a la parcela de arroz utilizada en 2001. Los valores diarios de K_c se obtuvieron dividiendo cada valor diario de ET_{arroz} por la estima diaria de ET_0 correspondiente.

En distintas fechas de 2001 y 2003 durante el ciclo de cultivo, se realizaron medidas de radiación fotosintéticamente activa (PAR) interceptada por el cultivo (PAR_{int}). Se utilizó un *ceptometer* (*Sunscan Canopy Analysis System* de la casa Delta-T), una barra de 1 m de longitud con 64 fotocélulas sensibles a esa radiación electromagnética. En cada fecha, y en varios puntos dentro de la parcela experimental, se realizaron de 2 a 4 lecturas por encima de la cubierta vegetal y 10 lecturas a ras de suelo. De esta forma, el PAR_{int} en cada fecha se calculó como:

$$PAR_{int} = 100 - \frac{PAR_s}{PAR_e} 100 \quad (3)$$

donde: PAR_s , PAR medio medido a ras de suelo ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); PAR_e , PAR medio medido por encima del cultivo ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Asimismo, se obtuvieron estimas del índice de área foliar (LAI) mediante la ecuación de Beer (Flénet et al., 1996):

$$LAI = \frac{\ln\left(\frac{PAR_s}{PAR_e}\right)}{-k} \quad (4)$$

donde: k , coeficiente de extinción; para arroz, se consideró un valor de $k = 0,60$ (Kropff y Lotz, 1993).

Las comparaciones estadísticas entre los distintos conjuntos de valores semihorarios y diarios de LE se realizaron mediante análisis de regresión simple ($y = b_0 + b_1 x$) y análisis de errores, con el cálculo de los estadísticos error medio de estimación (MEE) y raíz cuadrada del error cuadrático medio ($RMSE$), tal como se describe en Willmott (1982), y error relativo (RE), el cociente entre $RMSE$ y la media de la variable x .

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 lista los resultados de los análisis de regresión y de errores de la comparación entre los 4 conjuntos de valores semihorarios de LE obtenidos en 2001 con el método de la renovación de la superficie. La correlación entre las estimas de LE obtenidas a las distintas alturas de medida fue bastante alta como indican los coeficientes de determinación, superiores a 0,94 en todos los casos. Sin embargo, todas las ordenadas en el origen y todas las pendientes de regresión fueron significativamente distintas de 0 y 1 ($\alpha = 0,95$), respectivamente, lo que indica que los valores semihorarios de LE obtenidos en las distintas alturas de medida fueron significativamente diferentes entre sí. De hecho, esas diferencias fueron de cierta magnitud ya que los valores de $RMSE$ variaron entre 24,1 y 36,8 $W m^{-2}$, que, en términos relativos (RE), representan incertidumbres medias de entre el 17 y el 25 %. Aún así, no se observó tendencia a sobrestimar ni a subestimar puesto que los valores de MEE fueron bastante pequeños, entre 1,0 y 3,0 $W m^{-2}$ (Tabla 1). Estos resultados

fueron consecuencia en parte de las pequeñas dimensiones de la parcela experimental (1,0 ha), algo habitual en muchos ensayos, por lo que las condiciones de fetch no pudieron cumplirse completamente. Probablemente, alguna de las alturas de medida se encontró por encima de la subcapa inercial de la capa límite de la atmósfera, dentro de la cual se cumplen las condiciones de flujos constantes de calor y vapor de agua con la altura (Monteith y Unsworth, 1990).

En 2003, se decidió disminuir las alturas de medida para que éstas estuvieran más en consonancia con las dimensiones de la parcela experimental. Sólo se usaron tres alturas de medida para evitar que la más alta estuviera por encima de la subcapa inercial. Esta reducción de alturas conlleva el riesgo de realizar medidas muy cerca del suelo, dentro de la subcapa rugosa de la capa límite de la atmósfera donde tampoco se esperan flujos constantes de calor latente y vapor de agua (Monteith y Unsworth, 1990). Por ello, se decidió subir las alturas de medida según el cultivo creciera con el fin de intentar en todo momento estar por encima de la subcapa rugosa. La Tabla 1 muestra los análisis de regresión y de errores correspondientes a las comparaciones entre los 3 conjuntos de valores semihorarios de *LE* obtenidos en 2003. Asimismo, los coeficientes de determinación fueron muy altos, superiores a 0,98. Pero las ordenadas en el origen y las pendientes de regresión fueron significativamente diferentes de 0 y 1, respectivamente ($\alpha = 0,95$), lo que nuevamente indica que los valores semihorarios de *LE* fueron distintos entre sí. Los valores de *RMSE* fueron más bajos que en 2001 y variaron entre 21,3 y 24,2 $W m^{-2}$, al igual que los de *RE*, que variaron entre el 14 y el 16 %. Asimismo, los valores de *MEE* (entre -2,4 y 1,5 $W m^{-2}$) sugieren que no hubo tendencia a sobrestimar ni a subestimar.

Tabla 1. Análisis de regresión simple ($y = b_0 + b_1 x$) y de errores de la comparación entre los valores semihorarios de *LE* obtenidos con el método de renovación de la superficie a distintas alturas en 2001 y 2003. *x*, variable independiente; *y*, variable dependiente; *N*, nº de periodos semihorarios; R^2 coeficiente de determinación; b_0 , ordenada en el origen; b_1 , pendiente de regresión; *MEE*, error medio de estimación; *RMSE*, raíz cuadrada del error cuadrático medio; *RE*, error relativo.

<i>x</i>	<i>y</i>	<i>N</i>	R^2 %	b_0 $W m^{-2}$	b_1 Sin dimensiones	<i>MEE</i> $W m^{-2}$	<i>RMSE</i> $W m^{-2}$	<i>RE</i> %
2001								
<i>LE</i> (z_1)	<i>LE</i> (z_2)	6475	0,976	7,39 ⁽¹⁾	0,957 ⁽²⁾	1,1	24,1	16,6
<i>LE</i> (z_1)	<i>LE</i> (z_3)	6476	0,960	11,90 ⁽¹⁾	0,931 ⁽²⁾	1,9	31,4	21,6
<i>LE</i> (z_1)	<i>LE</i> (z_4)	6151	0,944	15,07 ⁽¹⁾	0,917 ⁽²⁾	3,0	36,8	25,3
<i>LE</i> (z_2)	<i>LE</i> (z_3)	6519	0,970	5,85 ⁽¹⁾	0,967 ⁽²⁾	1,0	25,9	17,6
<i>LE</i> (z_2)	<i>LE</i> (z_4)	6182	0,957	9,03 ⁽¹⁾	0,954 ⁽²⁾	2,2	31,1	21,1
<i>LE</i> (z_3)	<i>LE</i> (z_4)	6232	0,965	4,57 ⁽¹⁾	0,977 ⁽²⁾	1,2	27,5	18,6
2003								
<i>LE</i> (z_1)	<i>LE</i> (z_2)	5837	0,987	2,59 ⁽¹⁾	0,968 ⁽²⁾	-2,4	21,3	13,8
<i>LE</i> (z_1)	<i>LE</i> (z_3)	6022	0,983	4,21 ⁽¹⁾	0,967 ⁽²⁾	-1,1	24,1	15,1
<i>LE</i> (z_2)	<i>LE</i> (z_3)	5992	0,982	3,00 ⁽¹⁾	0,990 ⁽²⁾	1,5	24,2	15,6

⁽¹⁾ significativamente diferente de 0; ⁽²⁾ significativamente diferente de 1 ($\alpha = 0,95$).

En consecuencia, esa falta de subestimación o sobrestimación sugiere que, a escala diaria, las diferencias entre los valores de *LE* obtenidos en las distintas alturas de medida deben ser menores. La Tabla 2 lista los correspondientes análisis de regresión y de errores obtenidos al comparar los promedios diarios de *LE* en ambos años. Los coeficientes de determinación fueron algo menores, entre 0,91 y 0,95, que en el caso de los valores semihorarios. Sin embargo, las ordenadas en el origen se aproximaron más a 0; así, 7 de las 9 ordenadas en el origen calculadas no fueron significativamente diferentes de 0 ($\alpha =$

0,95). Asimismo, ninguna pendiente de regresión fue significativamente diferente de 1 ($\alpha = 0,95$). Los valores de *RMSE* en 2001 fueron menores que en el caso de los valores semihorarios; en 2003, los valores de *RMSE* fueron similares a los observados para los valores semihorarios. Aún así, en todos los casos los valores de *RE* fueron claramente menores que para el caso de valores semihorarios y variaron entre el 8 y el 11 %. Esta incertidumbre es similar a la asociada a cualquier método micrometeorológico (Allen et al., 1996). Por ello, parece razonable suponer que, a pesar de las diferencias observadas en los valores semihorarios de *LE* entre las distintas alturas de medida, a escala diaria esas diferencias desaparecen en gran medida y, por tanto, esos distintos conjuntos de valores de *LE* se pueden suponer como razonablemente similares.

Tabla 2. Análisis de regresión simple ($y = b_0 + b_1 x$) y de errores de la comparación entre sí de los valores diarios de *LE* obtenidos con el método de renovación de la superficie a distintas alturas en 2001 y 2003. *x*, variable independiente; *y*, variable dependiente; *N*, nº de periodos semihorarios; R^2 coeficiente de determinación; b_0 , ordenada en el origen; b_1 , pendiente de regresión; *MEE*, error medio de estimación; *RMSE*, raíz cuadrada del error cuadrático medio; *RE*, error relativo.

<i>x</i>	<i>y</i>	<i>N</i>	R^2 %	B_0 W m ⁻²	b_1 Sin dimensiones	<i>MEE</i> W m ⁻²	<i>RMSE</i> W m ⁻²	<i>RE</i> %
2001								
<i>LE</i> (<i>z</i> ₁)	<i>LE</i> (<i>z</i> ₂)	154	0,944	4,46 ⁽²⁾	0,985 ⁽³⁾	2,3	11,9	8,2
<i>LE</i> (<i>z</i> ₁)	<i>LE</i> (<i>z</i> ₃)	155	0,950	6,04 ⁽¹⁾	0,978 ⁽³⁾	2,9	11,3	7,8
<i>LE</i> (<i>z</i> ₁)	<i>LE</i> (<i>z</i> ₄)	149	0,906	5,23 ⁽²⁾	0,988 ⁽³⁾	3,5	16,1	11,0
<i>LE</i> (<i>z</i> ₂)	<i>LE</i> (<i>z</i> ₃)	154	0,949	5,70 ⁽¹⁾	0,965 ⁽³⁾	0,5	11,2	7,6
<i>LE</i> (<i>z</i> ₂)	<i>LE</i> (<i>z</i> ₄)	148	0,913	4,78 ⁽²⁾	0,977 ⁽³⁾	1,4	15,3	10,3
<i>LE</i> (<i>z</i> ₃)	<i>LE</i> (<i>z</i> ₄)	149	0,936	1,05 ⁽²⁾	0,999 ⁽³⁾	0,9	13,0	8,8
2003								
<i>LE</i> (<i>z</i> ₁)	<i>LE</i> (<i>z</i> ₂)	145	0,917	1,23 ⁽²⁾	0,957 ⁽³⁾	-5,7	15,0	9,5
<i>LE</i> (<i>z</i> ₁)	<i>LE</i> (<i>z</i> ₃)	145	0,921	-2,68 ⁽²⁾	1,030 ⁽³⁾	2,0	14,6	9,2
<i>LE</i> (<i>z</i> ₂)	<i>LE</i> (<i>z</i> ₃)	145	0,909	3,91 ⁽²⁾	1,024 ⁽³⁾	7,6	17,2	11,3

⁽¹⁾ significativamente diferente de 0; ⁽²⁾ no significativamente diferente de 0;

⁽³⁾ no significativamente diferente de 1 ($\alpha = 0,95$).

Por tanto, para cada media hora, los valores semihorarios de *LE* calculados para cada altura de medida se promediaron para obtener un único valor semihorario de *LE* y, sumando los 48 valores semihorarios, obtener un valor diario de evapotranspiración de arroz (ET_{arroz}). La Figura 1 muestra los valores diarios de ET_{arroz} así como los de ET_0 obtenidos con el método FAO Penman-Monteith. En líneas generales, se observa que las variaciones de ET_{arroz} a lo largo del ciclo de cultivo fueron muy similares a las de la ET_0 . Aproximadamente hasta unos 50-60 días después de siembra, los valores de ET_{arroz} fueron algo menores que los de ET_0 ; posteriormente fueron algo mayores y tan sólo en los últimos días del ciclo los valores de ET_0 volvieron a ser ligeramente mayores que los de ET_{arroz} .

En ambos años, el cultivo del arroz tardó en implantarse en campo, su crecimiento durante la fase inicial del ciclo de cultivo fue muy lento y no se produjo una cobertura de suelo de alrededor del 10-20 % hasta unos 50-60 días después de siembra. Durante esta etapa inicial fue necesario realizar riegos frecuentes, casi diarios, durante el primer mes para conseguir la implantación del cultivo. En consecuencia, los valores de ET_{arroz} durante la fase inicial del cultivo fueron casi iguales a los de la ET_0 . Los problemas de implantación del cultivo fueron mayores en 2001 que en 2003 debido al menor número de riegos realizado en 2001 y al mejor control de malas hierbas en 2003. Así, los valores de *PAR* interceptado y, sobre todo, de *LAI* fueron mayores en 2003 (Figura 2). Hacia la segunda mitad del ciclo de

cultivo, particularmente entre los 80 y 120 días después de siembra, los valores de ET_{arroz} de 2003 fueron claramente superiores a los obtenidos en 2001. En esas fechas, el año 2003 fue más caluroso que el año 2001, aunque algo menos ventoso (Figura 3). Los valores de ET_0 en 2001 y 2003 mostraron un comportamiento similar (Figura 1).

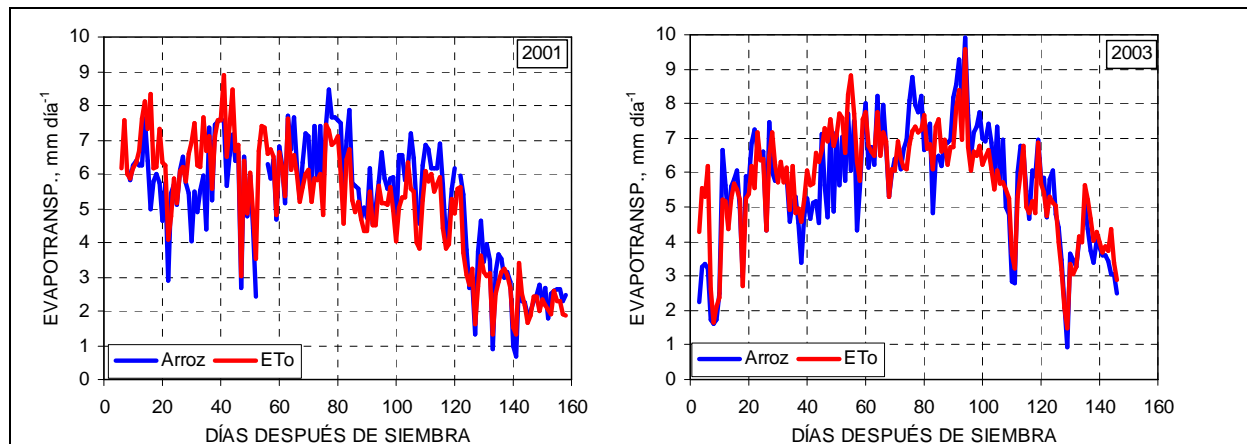


Figura 1. Valores diarios de evapotranspiración de arroz bajo riego por aspersión (ET_{arroz}) y de referencia (ET_0) obtenidos en 2001 y 2003 en Zaragoza.

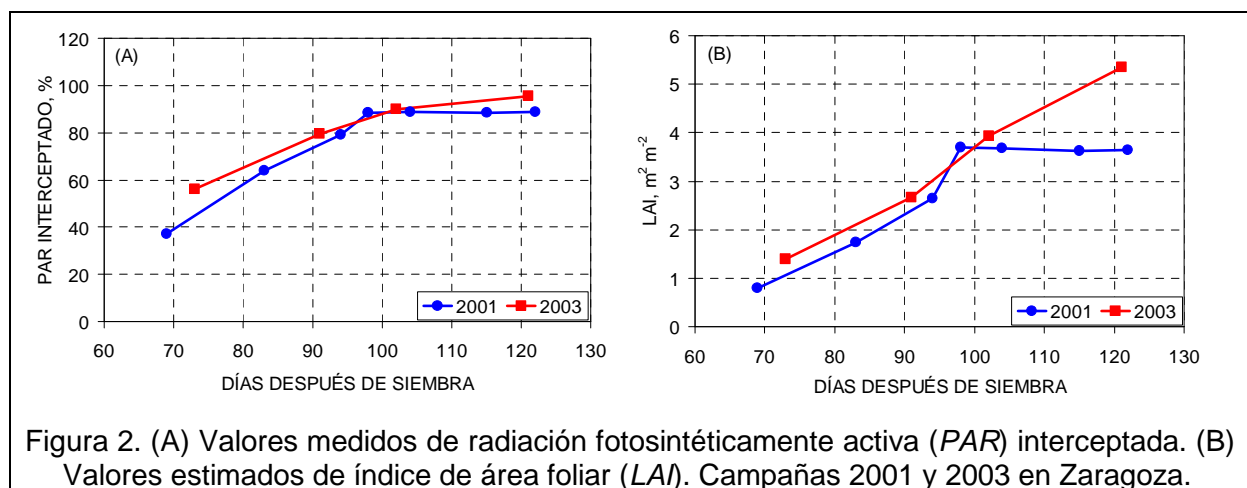


Figura 2. (A) Valores medidos de radiación fotosintéticamente activa (PAR) interceptada. (B) Valores estimados de índice de área foliar (LAI). Campañas 2001 y 2003 en Zaragoza.

Al final del ciclo de cultivo, los valores de ET_{arroz} en 2003 fueron apreciablemente mayores que en 2001 pero las altas temperaturas registradas en el verano de 2003 y el adelanto de la fecha de siembra originaron un cierto acortamiento del ciclo de cultivo de modo que la fase final del mismo en 2003 fue en septiembre mientras que en 2001 fue en octubre, mes más frío y en el que la demanda evaporativa es bastante menor. En 2001, desde siembra a cosecha, el ciclo de cultivo duró 158 días mientras que en 2003 duró 153 días. También, el mayor LAI observado en 2003 contribuyó a unos valores de ET_{arroz} algo más altos en 2003. Entre el 64 % (en 2001) y el 67 % (en 2003) de todos los valores diarios de ET_{arroz} fueron superiores a 5.0 mm día^{-1} . La Tabla 3 lista los valores medios mensuales y los valores totales de ET_{arroz} obtenidos en los dos años. Salvo en el mes final del ciclo de cultivo, los valores medios mensuales de ET_{arroz} superaron los 5.0 mm día^{-1} . En total, en 2001 la ET_{arroz} fue de 799 mm y en 2003 de 812 mm. A pesar de acortarse el ciclo de cultivo, las mayores temperaturas de 2003 ocasionaron una ET_{arroz} estacional algo mayor (Tabla 3).

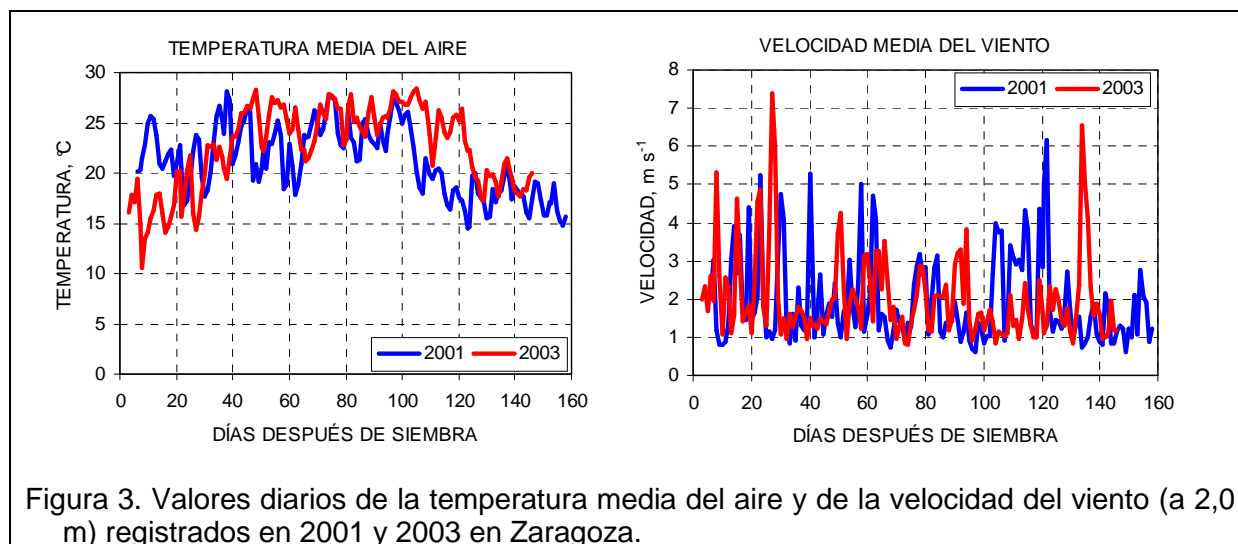


Figura 3. Valores diarios de la temperatura media del aire y de la velocidad del viento (a 2,0 m) registrados en 2001 y 2003 en Zaragoza.

Tabla 3. Valores medios mensuales y valores totales de la evapotranspiración de arroz bajo riego por aspersión (ET_{arroz}) en 2001 y 2003 en Zaragoza.

	mm día ⁻¹						mm
	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Total
2001	6,2	5,8	6,0	6,2	4,7	2,4	799
2003	5,0	5,8	7,2	6,0	3,5		812

La Figura 4 muestra coeficientes de cultivo (medias de cinco días) obtenidos para el cultivo del arroz bajo riego por aspersión en Zaragoza en 2001 y 2003. En términos generales, en ambos años, los valores del coeficiente de cultivo (K_c) variaron entre 0,80 y 1,20. La mayor similitud entre los K_c de 2001 y los de 2003 se produjo en el período de 60 a 130 días después de siembra. La fase inicial del cultivo fue muy larga en ambos años y no se alcanzaron valores de alrededor del 10-20 % de suelo sombreado hasta unos 50-60 días después de siembra. Las mayores discrepancias entre los dos años se observaron antes de estos 60 días después de siembra. La longitud de la fase inicial fue debida a que al cultivo le costó implantarse en el campo. El arroz es una planta muy sensible al encostramiento de los suelos, un problema típico en el regadío aragonés, y a otros problemas, como la competencia de las malas hierbas. Por ello, fue necesario regar con frecuencia durante esta fase. En 2003 se realizaron algunos riegos más que en 2001 aconsejados por la experiencia de 2001. Además, en 2003, se registraron 99.2 mm de precipitación durante esta fase inicial, por sólo 12.6 mm en 2001. Todos estos factores llevaron a un mayor desarrollo del cultivo en 2003 (Figura 2) lo que, junto a la mayor humedad del suelo, presumiblemente originó que en 2003 los valores de K_c durante la fase inicial fueran algo mayores y con menores fluctuaciones que en 2001. A partir del día 30 después de siembra, los valores de K_c de 2003, que habían alcanzado valores de hasta 1,10, descendieron hasta valores de 0,90, más parecidos a los obtenidos en 2001. Probablemente, este hecho se debió a que el 77 % de la precipitación registrada en la fase inicial del cultivo en 2003 tuvo lugar antes del día 30 después de siembra. Aun con la incertidumbre ocasionada por las diferencias entre los dos años, se podría decir que el coeficiente de cultivo del arroz bajo riego por aspersión en Zaragoza durante la fase inicial es de alrededor del 0,90 aunque este valor puede verse modificado sustancialmente en función de la humedad del suelo que a su vez depende de las precipitaciones que se registren en la fase inicial.

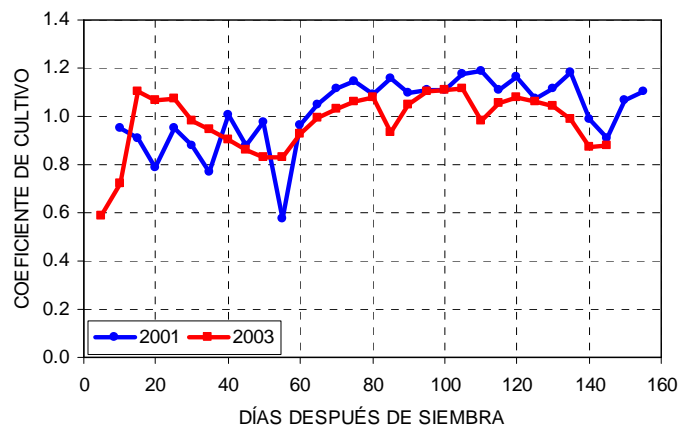


Figura 4. Coeficientes de cultivo (medias de 5 días) del arroz bajo riego por aspersión en Zaragoza obtenidos en 2001 y 2003.

A partir del día 60 después de siembra, el cultivo inició una rápida fase de crecimiento y en unos 20 días se pasó de un 10 % a un 70-80 % de suelo sombreado. Los valores de K_c subieron hasta alrededor de 1,10 en 2003 y 1,15 en 2001 (Figura 4). La fase de máximo desarrollo del cultivo también fue larga y duró unos 50 días, hasta unos 130 días después de siembra. Durante esta fase, los valores de K_c oscilaron con ligeras fluctuaciones alrededor de los valores antes indicados. No está clara la causa de que en 2001 los valores de K_c fueran ligeramente superiores a los de 2003. Por un lado, el desarrollo del cultivo fue mayor en 2003 (Figura 2) pero sin embargo, los valores de K_c fueron mayores en 2001. Por otra parte, a partir del día 60 después de siembra, los promedios de la humedad relativa mínima fueron del 33 % en 2001 y 27 % en 2003, mientras que los de la velocidad del viento fueron de $1,9 \text{ m s}^{-1}$ en ambos años. Probablemente, estas diferencias en K_c en esta fase de máximo desarrollo sean consecuencia sobre todo de la incertidumbre de las medidas realizadas.

A partir de los 130 días después de siembra, los valores de K_c disminuyeron hasta 0,90 aproximadamente en ambos años, aunque en 2001 hubo un aumento después del día 145 después de siembra. Quizás este aumento sea simplemente un artefacto causado porque los valores de ET_{arroz} y ET_0 en estos últimos días del ciclo de cultivo en 2001 fueron muy bajos (Figura 1) y, por ello, el comportamiento del cociente ET_{arroz}/ET_0 fue más errático. No obstante, los resultados de la Figura 4 indican que la fase final del ciclo de cultivo del arroz bajo riego por aspersión duró unos 20-30 días.

Los rendimientos finales del cultivo del arroz en 2001 (5447 kg ha^{-1}) sólo fueron ligeramente menores a los obtenidos en 2003 (5641 kg ha^{-1}). Estos rendimientos fueron de aproximadamente un 75 a un 80 % de los obtenidos en parcelas comerciales de cultivo de arroz bajo riego por inundación en el área de Grañen (Huesca) que es, de las zonas arroceras comerciales aragonesas, la más cercana a Zaragoza. Durante estos dos años de experiencia, han existido algunos problemas agronómicos en el cultivo del arroz bajo riego por aspersión, como control de las malas hierbas, fechas y dosis de siembra más adecuadas, problemas de nascencia, etc. Estos problemas han afectado a los resultados aquí presentados en una cuantía no conocida. Gran parte de estos problemas se han debido al hecho de que aún existe poca experiencia en el cultivo del arroz bajo riego por aspersión. Por ello, los resultados de este trabajo deben considerarse con precaución. Sería conveniente que este trabajo se realizara durante algunos años más, tras resolver más adecuadamente los problemas apuntados, para obtener datos más sólidos sobre la evapotranspiración y los coeficientes de cultivo del arroz bajo riego por aspersión.

4. CONCLUSIONES

Los valores semihorarios de LE obtenidos con el método de renovación de la superficie en distintas alturas de medida fueron significativamente diferentes entre sí en los dos años ($\alpha = 0,95$). Esas diferencias no fueron sistemáticas y, a escala diaria, se redujeron hasta unos niveles de incertidumbre similares a los de otros métodos micrometeorológicos (alrededor de un 10 %).

Los valores diarios de ET_{arroz} a lo largo del ciclo de cultivo siguieron una evolución similar a la de la ET_0 , sobre todo a partir de los 50-60 días después de siembra. Estos valores fueron relativamente altos como corresponde a un cultivo que requiere de riego frecuente: entre un 64 y un 67 % de todos los valores diarios determinados fueron superiores a $5,0 \text{ mm día}^{-1}$.

La longitud de la fase inicial del cultivo fue bastante larga, de unos 50-60 días. La fase de crecimiento fue corta, de unos 20 días. La fase de máximo desarrolló duró unos 50 días y, por fin, la fase final duró unos 20-30 días. Los valores del coeficiente de cultivo (Kc) en la fase inicial fueron de alrededor de 0,9 aunque estos valores mostraron fluctuaciones importantes ocasionadas por las precipitaciones. Los valores de Kc de la fase de máximo desarrollo oscilaron entre 1,10 y 1,15 y los de la fase final fueron de alrededor de 0,9.

Estos resultados de ET_{arroz} y Kc deben considerarse con precaución. Se precisa resolver adecuadamente algunos problemas agronómicos que persisten en el cultivo del arroz bajo riego por aspersión. Será necesario realizar campañas ulteriores de medidas de la evapotranspiración de este cultivo bajo este sistema de riego.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No 56. FAO, Roma, Italia. 300 pp.
- Allen R.G., Pruitt W.O., Businger J.A., Fritschen L.J., Jensen M.E., Quinn F.H. (1996). Evaporation and Transpiration. En: ASCE Hydrology Handbook (2ª ed.). ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No 28. American Society of Civil Engineers (ASCE), Nueva York, EE.UU. 768 pp.
- DGA (2001). Datos estadísticos agrarios de Aragón. 1999 y 2000. Diputación General de Aragón (DGA), Zaragoza, España.
- Dueñas R., López A. (1984). Elementos fundamentales del régimen de riego en el cultivo del arroz. *Agrícola Vergel*. 35: 635 – 639.
- Faci J., Martínez Cob A., Cabezas A. (1994). Agroclimatología de los regadíos del Bajo Gállego: doce años de observaciones diarias en Montañana (Zaragoza). Diputación General de Aragón, Zaragoza, España. 231 pp.
- Flénet F., Kiniry J.R., Board J.E., Westgate M.E., Reicosky D.C. 1996. Row spacing effects on light extinction coefficients of corn, sorghum, soybean, and sunflower. *Agronomy Journal*. 88: 185-190.
- Gao W., Shaw R.H., Paw U K.T. (1989). Observation of organized structure in turbulent flow within and above a forest canopy. *Boundary-Layer Meteorology*. 47: 349-377.
- Harazono Y., Kim J., Miyata A., Choi T., Yun J.L., Kim J.W. (1998). Measurement of energy budget components during the International Rice Experiment (IREX) in Japan. *Hydrological Processes*. 12 (13-14): 2081-2092.

- Junta de Extremadura (1999). Estudio del comportamiento agronómico de variedades de arroz con tratamientos hídricos diferenciados. Informe interno. SIA, Junta de Extremadura, Badajoz, España.
- Kropff M.J., Lotz L.A.P. 1993. Eco-physiological characterization of the species. En: Modelling crop-weed interactions. Kropff M.J., Van Laar H.H. (eds.). 83-104. CAB International and International Rice Research Institute. Wallingford, Reino Unido.
- MAPA (2001). Anuario de estadística agroalimentaria. Secretaría General Técnica. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación (MAPA), Madrid, España.
- Monteith J.L., Unsworth M.H. 1990. Principles of environmental physics. Edward Arnold. Londres, Reino Unido. 291 pp.
- Pérez Coveta O., Martínez Cob A. 2002. Determinación de la evapotranspiración de arroz bajo dos sistemas de riego. XX Congreso Nacional de Riegos. Ciudad Real, 12-14 de junio. Junta de Comunidades de Castilla La Mancha, Toledo. 19-21.
- Renaud F., Ferguson J.A., Scott H.D., Miller D.M. (1999). Estimation of seasonal rice evapotranspiration. In B.R. Wells Rice Research Studies. Norman, R.J., Beyrouy, C.A. (eds.). 283-293 pp. Arkansas Agricultural Experiment Station, EE.UU.
- Shah S.B., Edling R.J. (2000). Daily evapotranspiration prediction from Louisiana flooded rice field. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 126: 8-13.
- Shih S.F., Rahi G.S., Harrison D.S. (1982). Evapotranspiration studies on rice in relation to water use efficiency. Transactions of the ASAE. 25 (3): 702-707, 712.
- Spano D., Snyder R.L., Duce P., Paw U K.T. (1997). Surface renewal analysis for sensible heat flux density using structure functions. Agricultural and Forest Meteorology. 86: 259-271.
- Spano D., Snyder R.L., Duce P., Paw U K.T. (2000). Estimating sensible and latent heat flux densities from grapevine canopies using surface renewal. Agricultural and Forest Meteorology. 104 (3): 171-183.
- Tolosa M. (1990). El cultivo del arroz. Informaciones Técnicas.1. Diputación General de Aragón, Zaragoza, España. 8 pp.
- Tyagi N.K., Sharma D.K., Luthra S.K. (2000). Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower with lysimeter. Agricultural Water Management 45: 41-54.
- Van Atta C.W. (1977). Effect of coherent structures on structure functions of temperature in the atmospheric boundary layer. Archives of Mechanics. 29 (1): 161-171.
- Willmott C.J., (1982). Some comments on the evaluation of model performance. Bulletin of American Meteorological Society. 63 (11): 1309-1313.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado con el proyecto AGL-2000-1775-C03-02, del Plan Nacional de I+D (Ministerio de Ciencia y Tecnología). Los autores agradecen a Jesús Gaudó, Miguel Izquierdo y Enrique Mayoral su ayuda impagable en la manufactura e instalación de las estructuras de soporte de la instrumentación y su asistencia en las tareas agrícolas; a Ignacio Clavería por su ayuda en la recopilación y almacenamiento informático de los datos de campo; y a José Cavero por su asistencia técnica en el tratamiento contra las malas hierbas.