

PB-06-2023

Comunicación científico-técnica

## Modelización de las necesidades hídricas en el cultivo de brócoli. Evaluación fisiológica y agronómica

## Modelling crop water requirements of a broccoli cultivation. Physiological and agronomic assessment

Ramírez Cuesta, Juan Miguel<sup>1,2</sup>; Intrigliolo, Diego S.<sup>2</sup>; Martínez-Calvo, José<sup>2</sup>; Bolumar-Bolumar, Joaquín<sup>2</sup>; Cámara, Eloy<sup>3</sup>; Bonet, Luis<sup>3</sup>; Pérez-Pérez, Juan Gabriel<sup>4</sup>

- 1 Dipartimento di Agricoltura, Alimentazione e Ambiente (Di3A), Università degli Studi di Catania, Catania, Italia, ramirezcuesta.jm@gmail.com
- 2 Departamento de Ecología, Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CIDE- CSIC-UV-GVA), Moncada, Valencia, España.
- 3 Servicio de Tecnología del Riego, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (STR-IVIA), Moncada, Valencia, España.
- 4 Centro para el Desarrollo de la Agricultura Sostenible, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (CDAS-IVIA), Moncada, Valencia, España.

### Resumen:

El incremento en la frecuencia e intensidad de los períodos de sequía al que nos enfrentamos en las últimas décadas, especialmente en climas áridos, evidencia el papel crítico que tiene y tendrá el riego de precisión en la agricultura mediterránea. En este sentido, es cada vez más común el uso de modelos para la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos; y de tecnologías que faciliten el seguimiento del estado hídrico de los mismos. El presente trabajo tiene por objetivo evaluar las estimaciones de los requerimientos hídricos de un cultivo de brócoli proporcionados por el modelo Irrigation Advisor, en comparación con una segunda estrategia manejada por el agricultor, quien decidió el agua a aplicar. Adicionalmente, ambas estrategias se evaluaron fisiológica y agronómicamente mediante lisimetría, termografía, intercambio gaseoso y fluorescencia de clorofilas.

Los resultados obtenidos mostraron que la cantidad de riego aplicada por el agricultor durante la campaña fue un 16% menor que la aplicada en tratamiento basado en el modelo Irrigation Advisor. La correcta gestión del riego se verificó mediante un microlisímetro instalado en el tratamiento basado en el modelo Irrigation Advisor, en el que no se evidenciaron eventos importantes de percolación profunda, ni descensos significativos en el peso del depósito donde se encontraba plantado el cultivo. En cambio, la infraestimación de la dosis de riego aplicada por el agricultor generó condiciones de déficit hídrico en el suelo, mostrando episodios de

estrés hídrico moderado en la planta. Dichos resultados fueron evidenciados por las medidas de termografía realizadas en campo, las cuales identificaron que el tratamiento del agricultor presentó una temperatura foliar más elevada que el tratamiento basado en Irrigation Advisor ( $\approx 1.5 - 2.3$  °C), durante la segunda mitad del ciclo. Finalmente, las medidas de conductancia estomática y transpiración aparente; también estaban en línea con las medidas de termografía, presentando el tratamiento del agricultor unos valores significativamente inferiores ( $\approx 24-57\%$ ) a los del tratamiento basado en Irrigation Advisor, únicamente en la segunda mitad del ciclo de cultivo. La ausencia de diferencias significativas entre tratamientos en términos de ratio de transporte de electrones y eficiencia del fotosistema II indicaron que la limitación en conductancia estomática y transpiración observada en el tratamiento del agricultor fue causada principalmente por un cierre estomático y no por daños en el fotosistema. La respuesta agronómica del cultivo en el tratamiento del agricultor mostró una menor altura de planta durante la segunda mitad del ciclo de cultivo ( $\approx 80-95\%$ ), y un menor peso de la misma en el momento de la recolección ( $\approx 15\%$ ) que el tratamiento basado en el modelo Irrigation Advisor. Por lo tanto, una reducción del peso en términos porcentuales similar al aporte hídrico realizado en la estrategia de riego del agricultor, confirman la elevada sensibilidad del cultivo del brócoli al déficit hídrico.

El presente trabajo pone de manifiesto la precisión de las estimaciones de los requerimientos hídricos del brócoli obtenidas mediante el modelo Irrigation Advisor; así como la utilidad de las metodologías evaluadas para la monitorización del estado hídrico del cultivo, favoreciendo la optimización de los recursos hídricos en agricultura.

**Palabras clave:** evapotranspiración del cultivo, estrés hídrico, intercambio de gases, fluorescencia de clorofilas, lisimetría

**Abstract:**

The increase in the frequency and intensity of drought periods that we have faced in recent decades, especially in arid climates, shows the critical role that precision irrigation has had and will play in Mediterranean agriculture. In this sense, the use of models to estimate the crop water requirements and technologies that facilitate monitoring their water status is increasingly common. The objective of this work is to evaluate the crop water requirements of a broccoli cultivation provided by the Irrigation Advisor model, in comparison with a second strategy where the farmer decided the amount of water applied. Additionally, both strategies were evaluated physiologically and agronomically through lysimetry, thermography, gas exchange and chlorophyll fluorescence.

The results obtained showed that the irrigation volumen applied by the farmer was 16% less than the treatment based on the Irrigation Advisor model. The proper irrigation management was verified using a microlysimeter installed in the treatment based on the Irrigation Advisor model, in which no significant events of deep percolation were evident, nor significant decreases in the weight of the tank where the crop was planted. On the other hand, the underestimation of the irrigation dose applied by the farmer generated conditions of water deficit in the soil, showing episodes of moderate water stress in the plant. These results were evidenced by the thermography measurements carried out in the field, which identified that the farmer's treatment presented a higher leaf temperature than the treatment based on Irrigation Advisor ( $\approx 1.5 - 2.3$  °C), during the second half of the cycle. Finally, the measurements of stomatal conductance and apparent transpiration; were also in line with the thermography measurements, with the farmer's treatment presenting significantly lower values ( $\approx 24-57\%$ ) than those of the treatment based on Irrigation Advisor, but only in the second half of the crop cycle. The absence of significant differences between treatments in terms of electron transport ratio and efficiency of photosystem II indicated that the limitation in stomatal conductance and transpiration observed in the farmer treatment was mainly caused by stomatal closure and not by damage to the photosystem. The agronomic response of the crop in the farmer's treatment showed a lower plant height during the second half of the crop cycle ( $\approx 80-95\%$ ), and a lower plant weight at harvest ( $\approx 15\%$ ), than the Irrigation Advisor treatment. Therefore, a reduction in weight in percentage terms similar to difference in irrigation volumes in the farmer treatment, confirms the high sensitivity of broccoli to water deficit.

The present work reveals the high accuracy of crop water requirements of broccoli estimated obtained through the Irrigation Advisor model; as well as the usefulness of the methodologies evaluated for monitoring the crop water status, favoring the optimization of water resources in agriculture.

**Keywords:** crop evapotranspiration, crop water stress, gas exchange, chlorophyll fluorescence, lysimetry

## 1. Introducción

El principal desafío de la agricultura de regadío consiste en reducir el uso de agua manteniendo o mejorando la producción de los cultivos. Para ello, es necesaria una estimación precisa de los requerimientos hídricos de los cultivos. Tradicionalmente, dichas estimaciones se basan en el enfoque estándar de la FAO (Allen et al., 1998) que utiliza la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) y un coeficiente de cultivo ( $K_c$ ). Los valores de  $K_c$  para los diferentes cultivos, provienen de estudios experimentales realizados en el pasado, basados principalmente en medidas de lisimetría (Doorenbos y Pruitt, 1974). Sin embargo, las estimaciones de los requerimientos basadas en estos valores de  $K_c$ , no siempre se ajustan de manera correcta a las necesidades reales de los cultivos, especialmente en cultivos de menor importancia donde el número de estudios disponibles para el cálculo de  $K_c$  es limitado. Este es el caso, por ejemplo, del cultivo del brócoli - un cultivo que ha incrementado considerablemente su superficie para satisfacer la creciente demanda de los mercados europeos - donde existen pocos estudios que hayan determinado su  $K_c$  (López Urrea et al., 2009). En este sentido, la utilización de modelos destinados al cálculo de la componente evapotranspirativa se plantea como una alternativa a metodologías más tradicionales para la obtención de recomendaciones de riego precisas. Un ejemplo de estos modelos, es el modelo Irrigation Advisor (Mirás-Avalos et al., 2019). Este modelo calcula la evaporación del suelo y la transpiración de la planta de manera separada, basándose en el cálculo de un balance hídrico del suelo en la zona radicular.

Así, los objetivos generales del presente trabajo fueron (i) evaluar las estimaciones de los requerimientos hídricos calculados mediante el modelo Irrigation Advisor utilizado en el ámbito del proyecto DigitalRiego; (ii) comparar dichas estimaciones con los volúmenes de riego aplicados siguiendo la estrategia comúnmente adoptada por un agricultor en la misma zona de estudio; y (iii) derivar una curva de  $K_c$  ajustada a través de datos obtenidos mediante un microlisímetro.

## 2. Materiales y métodos

El sitio de estudio fue una parcela de brócoli ('*Brassica oleracea*' cv. 'Ulysses') de 0.2 ha ubicado en Museros (Valencia, España) (39.5767 °N, 0.3627 °O; Figura 1). En dicha parcela se implementaron dos tratamientos de riego: (i) un tratamiento donde la dosis de riego se definió según las recomendaciones proporcionadas por el modelo Irrigation Advisor (en adelante, "DigitalRiego"); y (ii) un tratamiento donde el riego era gestionado directamente por el agricultor (en adelante "Agricultor"). El riego se distribuyó mediante un sistema de riego por goteo compuesto por 3 goteros por  $m^2$  con un caudal de  $1.7 L h^{-1}$  cada uno. La dosis aplicada fue monitorizada gracias a la instalación de un caudalímetro por tratamiento. El cultivo de brócoli se sembró el 20 de febrero de 2023 y tuvo una duración de ciclo de 77 días. Las condiciones agrometeorológicas, registradas por una estación meteorológica cercana, mostraron una temperatura promedio diaria del aire ( $T_{aire}$ ) y  $ET_0$  de  $16.2 °C$  y  $3.63 mm día^{-1}$ , respectivamente, para el período de referencia, sin ocurrencia de eventos de lluvia.



**Figura 1.** Localización de la parcela experimental de brócoli (39.5767 °N, 0.3627 °O) con la distribución de los tratamientos de riego.

A lo largo del ciclo del cultivo se realizaron seis campañas de campo, utilizando 12 plantas muestra por tratamiento: 1, 13 y 26 de marzo; 10 y 25 de abril y 5 de mayo. En cada fecha, se realizaron simultáneamente mediciones al mediodía de intercambio gaseoso y fluorescencia de clorofila en tres hojas por planta con un porómetro/fluorómetro portátil (LI 600, LI-COR, EE. UU.), incluida la conductancia estomática ( $g_s$ ,  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), tasa de transpiración foliar ( $E_{\text{hoja}}$ ,  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), tasa de transporte de electrones (ERT,  $\mu\text{mol e}^- \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y eficiencia del fotosistema II ( $\Phi\text{PSII}$ ). Además, también se adquirieron imágenes TIR con una cámara térmica portátil (FLIR E8-XT; Teledyne Flir, EE. UU.). Para cada imagen se adquirió la temperatura de cultivo ( $T_c$ ) de tres hojas representativas por planta. Adicionalmente, en el tratamiento DigitalRiego se instaló un microlisímetro de pesada de  $75 \times 150 \text{ cm}^2$ . Dicho microlisímetro permitió evaluar la tendencia temporal del peso de los depósitos de cultivo y de drenaje a lo largo de la campaña. A final de campaña, el rendimiento obtenido en cada uno de los tratamientos fue cuantificado en términos de peso y diámetro de pella, peso de planta y peso total. A partir de los datos de  $ET_c$  medidos en el microlisímetro y la  $ET_o$  registrada en la estación meteorológica cercana, se construyó la curva de  $K_c$  de la campaña. Por último, se llevaron a cabo Análisis de Varianzas (ANOVA) para evaluar posibles diferencias significativas entre tratamientos para cada uno de los parámetros analizados. La separación de medias se realizó utilizando el test de Tukey ( $p\text{-value} \leq 0.05$ ).

### 3. Resultados y discusión

La Figura 2 muestra la dosis de riego acumulada a lo largo de la campaña para cada uno de los tratamientos. Dicha gráfica muestra que prácticamente hasta mitad del ciclo del cultivo (Abril), el tratamiento de agricultor aplicó una ligera mayor dosis de riego que el tratamiento DigitalRiego. A partir de entonces, en la segunda mitad del ciclo del cultivo, el tratamiento del agricultor aplicó una menor dosis de riego que el tratamiento DigitalRiego (un 17% menos), resultando en un volumen final acumulado de 238 y 287 mm, respectivamente.

En la evolución de los pesos del depósito de cultivo y del depósito de drenaje (Figura 3) no se evidenciaron eventos importantes de percolación profunda, ni descensos significativos en el peso del depósito donde se encontraba plantado el cultivo, lo que evidencia la correcta gestión del riego en el tratamiento DigitalRiego.

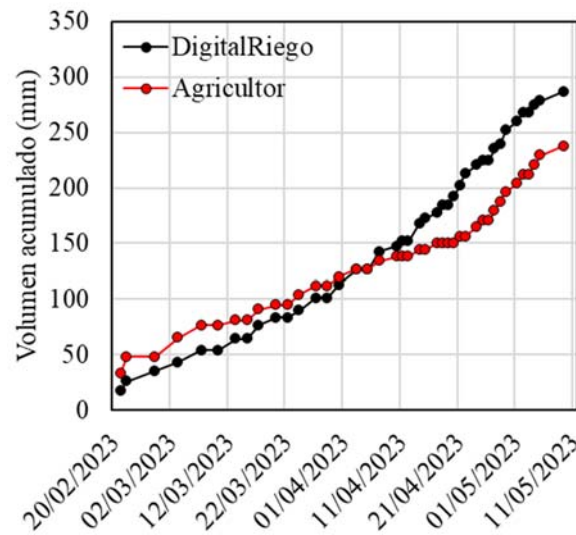


Figura 2. Riego acumulado en la parcela experimental de brócoli para los dos tratamientos implementados (DigitalRiego y Agricultor).

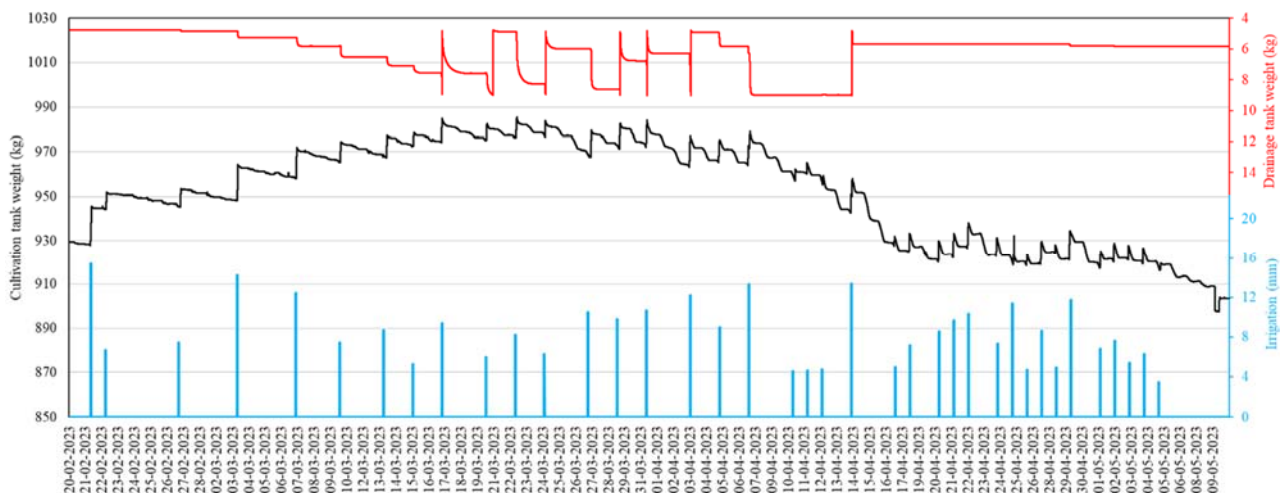
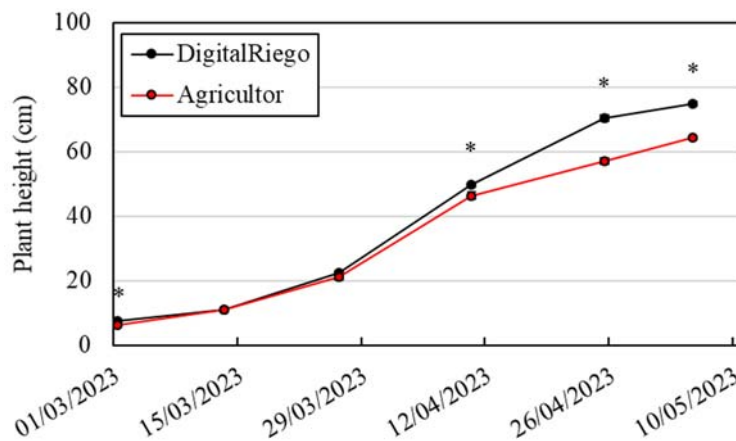


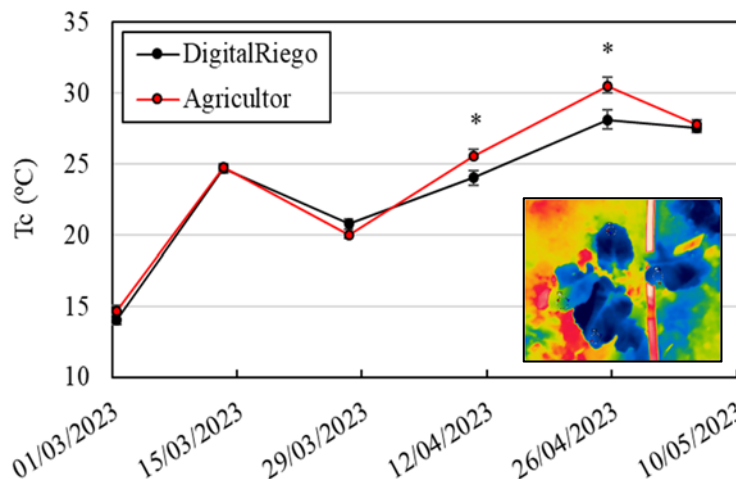
Figura 3. Evolución temporal del peso de los depósitos de cultivo y de drenaje del microlisímetro; y del riego aplicado para el tratamiento DigitalRiego.

La evolución de la altura de planta (Figura 4) muestra que, a pesar de la mayor dosis aplicada por el agricultor en la primera mitad de la campaña, esto no resultó en un incremento significativo de la altura de las plantas en este tratamiento en comparación con el tratamiento DigitalRiego. Sin embargo, la menor dosis aplicada por el agricultor durante la segunda mitad del ciclo del cultivo, sí provocó en unos evidentes efectos negativos en las plantas, las cuales alcanzaron una menor altura en comparación con el tratamiento DigitalRiego (64 vs 75 cm, respectivamente; a final de campaña).



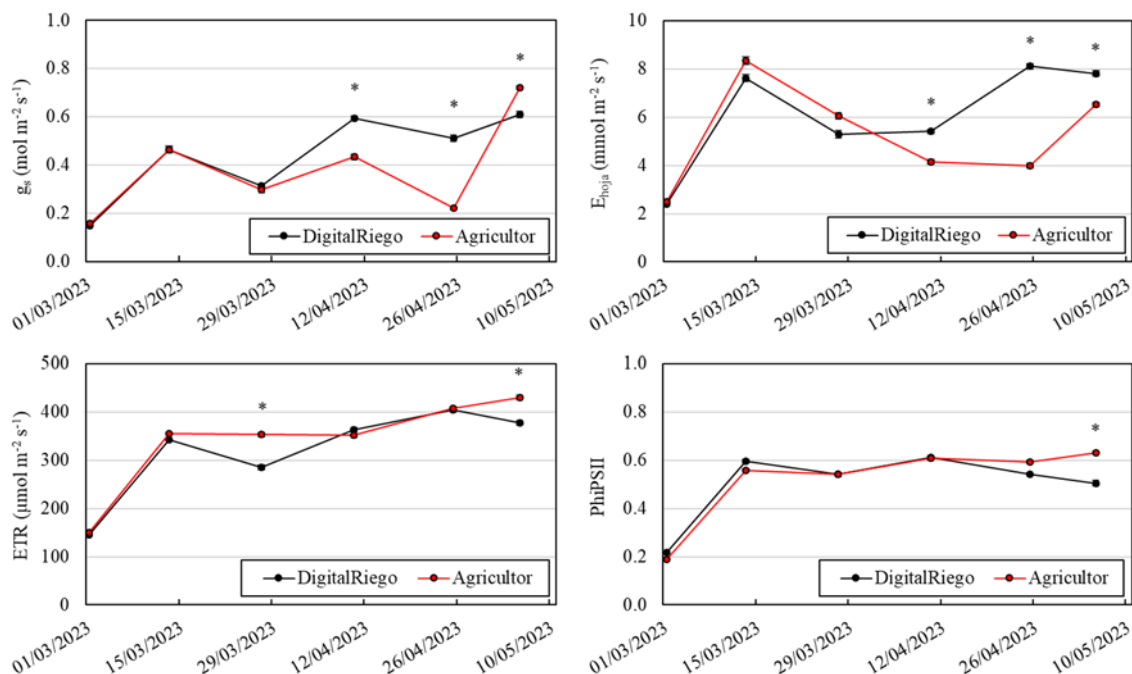
**Figura 4.** Evolución de la altura del cultivo para la campaña de brócoli. Los asteriscos identifican diferencias significativas entre tratamientos ( $p$ -value  $\leq 0.05$ ).

Con respecto a la temperatura del cultivo a lo largo de la campaña (Figura 5), al igual que con la altura de planta, no se observaron diferencias en temperatura del cultivo durante la primera mitad del ciclo del cultivo, lo que confirma nuevamente la hipótesis de que la mayor dosis aplicada por el agricultor no causó un beneficio sobre el cultivo. Sin embargo, sí que se apreció que la  $T_c$  fue significativamente inferior en el caso del tratamiento DigitalRiego durante la segunda mitad del ciclo que en el tratamiento del agricultor (con excepción de la última fecha, donde el agricultor aplicó una mayor dosis de riego probablemente condicionado por las diferencias observadas en las fechas anteriores).



**Figura 5.** Evolución de la temperatura del cultivo ( $T_c$ ) para la campaña de brócoli y ejemplo de imagen térmica. Los asteriscos identifican diferencias significativas entre tratamientos ( $p$ -value  $\leq 0.05$ ).

La Figura 6 muestra la evolución temporal de los parámetros de intercambio de gases y fluorescencia de clorofilas para cada uno de los tratamientos analizados. Durante la primera mitad de la campaña no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en términos de intercambio gaseoso ( $g_s$  y  $E_{hoja}$ ) ni de fluorescencia de clorofilas (ETR y PhiPSII). Sin embargo, en la segunda mitad del ciclo del brócoli, las plantas del tratamiento DigitalRiego presentaron unos valores de  $g_s$  y  $E_{hoja}$  significativamente superiores a los valores observados en las plantas del tratamiento del agricultor. Por el contrario, en este período tampoco se encontraron diferencias significativas entre tratamientos en los parámetros de fluorescencia de clorofilas, lo que pone de manifiesto que la limitación en conductancia estomática y transpiración observada en el tratamiento del agricultor fue causada principalmente por un cierre estomático y no por daños en el fotosistema.



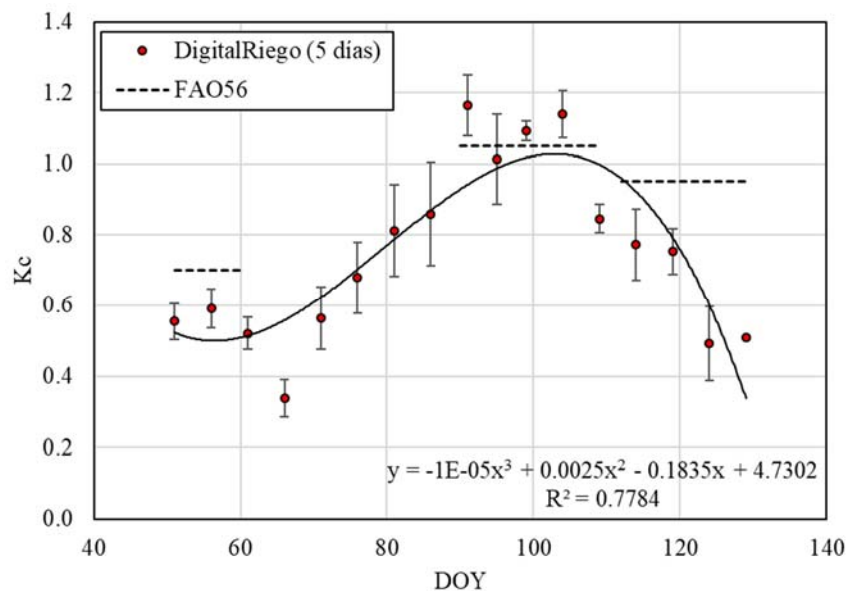
**Figura 6.** Evolución de los parámetros de intercambio de gases (conductancia estomática,  $g_s$ , y transpiración,  $E_{hoja}$ ) y fluorescencia de clorofilas (tasa de transporte de electrones, ETR, y eficiencia del fotosistema II, PhiPSII) para la campaña de brócoli. Los asteriscos identifican diferencias significativas entre tratamientos ( $p$ -value  $\leq 0.05$ ).

El distinto manejo de riego realizado en los distintos tratamientos provocó diferencias significativas también en los parámetros relacionados con el rendimiento (Tabla 1). De este modo, el tratamiento DigitalRiego obtuvo, en los dos pases de cosecha (9 y 11 de mayo), valores superiores al tratamiento del agricultor en términos de peso y diámetro de pella (0.65 *versus* 0.55 kg y 18.6 *versus* 17.4 cm, respectivamente), peso de planta (1.67 *versus* 1.46 kg, respectivamente) y peso total (2.31 *versus* 2.00 kg, respectivamente) (Tabla 1).

**Tabla 1.** Peso y diámetro de pella, peso de planta y peso total para cada uno de los tratamientos analizados en los dos pases de cosecha realizados (9 y 11 de mayo de 2023).

Fecha	Tratamiento	Peso pella (kg)	Diámetro pella (cm)	Peso planta (kg)	Peso total (kg)
9 mayo 2023	DigitalRiego	0.71a	18.9a	1.86a	2.58a
	Agricultor	0.61b	17.8b	1.59b	2.19b
11 mayo 2023	DigitalRiego	0.58a	18.4a	1.47a	2.05a
	Agricultor	0.49b	17.0b	1.34b	1.82b

Por último, a través de los datos de  $ET_c$  derivados del microlisímetro, promediados cada 5 días y de la  $ET_o$  obtenida de la estación meteorológica cercana, se obtuvo la curva de evolución temporal de  $K_c$  (Figura 7). En dicha figura se puede apreciar que el  $K_c$  en la fase inicial del cultivo ( $K_{c,ini}$ ) fue de 0.5 aproximadamente, alcanzando un valor cercano a 1.0 en la fase de desarrollo del mismo ( $K_{c,mid}$ ), descendiendo a valores de 0.4 a final del ciclo del cultivo ( $K_{c,end}$ ). Los valores de  $K_{c,ini}$  y  $K_{c,end}$  fueron ligeramente inferiores a los valores propuestos en el documento FAO56 (Allen et al., 1998), indicando unos menores consumos de agua por la planta y menores pérdidas por evaporación en el suelo con respecto a los niveles esperados según el documento Allen et al. (1998). Valores similares de  $K_c$  fueron obtenidos por López-Urrea et al. (2009), con valores mínimos en torno a 0.5 y máximos de 1.1, mostrando sin embargo un comportamiento diverso en la fase final de la curva, en la que sus valores se mantenían en torno a 1.0 mientras que la reducción de  $K_c$  fue mucho más evidente en nuestro caso ( $K_{c,end} = 0.4$ ).



**Figura 7.** Evolución temporal del coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) obtenido a través de los datos de  $ET_c$  medidos en el microlisímetro para el tratamiento DigitalRiego, y comparación con los valores propuestos en el documento FAO56 (Allen et al., 1998).

## 4. Conclusiones

El presente experimento pone de manifiesto que el modelo DigitalRiego fue capaz de ofrecer unas recomendaciones de riego precisas, sin mostrar síntomas de estrés, mientras que el tratamiento del agricultor, por su parte, mostró cierto estrés hídrico en la segunda mitad de la campaña como consecuencia de la aplicación de un riego deficitario que no satisfizo las necesidades óptimas del cultivo de brócoli. Dichos resultados fueron confirmados mediante las medidas lisimétricas, fisiológicas y agronómicas realizadas durante el ciclo de cultivo. Por último, dicho estudio derivó la curva de  $K_c$  basado en las medidas realizadas en el microlísimetro, lo que permite ajustar localmente los valores de  $K_c$  propuestos en el documento FAO56. De este modo, la utilización del modelo DigitalRiego y la obtención de la curva ajustada de  $K_c$  contribuyes a mejorar la eficiencia en la gestión y manejo de los recursos hídricos para el cultivo del brócoli bajo condiciones semi-áridas.

## 5. Agradecimientos

Este estudio se ha realizado en el marco de los proyectos DigitalRiego (INNEST/2022/63) financiado por la Agència Valenciana de la Innovació y la Unión Europea. Los autores agradecen a ANECOOP S. Coop. por poner a disposición el sitio de estudio y al grupo Agua y Cultivos del CIDE-CSIC-UV-GVA, CDAS-IVIA y STR-IVIA por su colaboración durante las campañas de campo.

## Referencias

1. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrig. and Drain., Paper no. 56, FAO, Rome, Italy.
2. Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1974. Crop water requirements. FAO Irrig. and Drain., Paper no. 24. FAO, Rome, Italy
3. López-Urrea, R., Montoro, A., López-Fuster, P., Fereres, E., 2009. Evapotranspiration and responses to irrigation of broccoli. *Agricultural Water Management*, 96(7), 1155-1161.
4. Mirás-Avalos, J. M., Rubio-Asensio, J. S., Ramírez-Cuesta, J. M., Maestre-Valero, J. F., Intrigliolo, D. S., 2019. Irrigation-Advisor—A decision support system for irrigation of vegetable crops. *Water*, 11(11), 2245.