

[MODELO DE OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA DEL AGUA DE RIEGO]

Efecto combinado del riego deficitario y la uniformidad de riego

E. López - Mata

J.M. Tarjuelo

J.A. de Juan

R. Ballesteros

A. Domínguez

Investigador, Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), Universidad de Castilla-La Mancha

En riego deficitario, tanto la uniformidad de riego como el calendario de riegos afectan al rendimiento y a la eficiencia del uso del agua, siendo interesante la simulación del efecto de la uniformidad de riego en los modelos de producción de los cultivos para acercarlos más a la realidad, así como desarrollar una metodología que permita obtener calendarios de riego que maximicen la producción. El modelo MOPECO simula el efecto de la uniformidad de riego dividiendo la parcela en un conjunto de subparcelas y aplicando una dosis diferente de riego a cada una de ellas según la uniformidad del agua de riego.

Para conseguir calendarios de riegos más eficientes, MOPECO implementa un algoritmo de distribución del déficit en cada una de las etapas del cultivo. Como aplicación, se han simulado cuatro calendarios de riego con distintos criterios de manejo, pero aplicando la misma cantidad total de agua de riego. Como resultado se obtiene un incremento de un 9% de producción con respecto al calendario de riegos normalmente aplicado en la zona cuando se utiliza en calendario optimizado por MOPECO. Los resultados ofrecidos por MOPECO pueden ser de gran ayuda a la hora de diseñar la estrategia de riego de cualquier zona regable con recursos hídricos limitados.

[Introducción

En general, cuando se aplica un riego, no toda el agua se reparte por igual en toda la parcela regada, si no

que dependiendo de la uniformidad del sistema de riego habrá zonas donde se aporte más agua que en otras, influyendo en la producción obtenida para una misma cantidad de agua aplicada, sobre todo si se utilizan riegos deficitarios.

También tiene especial influencia en el riego deficitario el momento de aplicación del riego y la cuantía de cada uno de los riegos, siendo muy variable la producción obtenida para una misma cantidad de agua dependiendo del calendario de riegos utilizado.

El objetivo de este trabajo ha sido desarrollar una metodología capaz de optimizar la aplicación del agua de riego a los cultivos bajo condiciones de estrés hídrico, teniendo en cuenta el efecto de la uniformidad del riego y el porcentaje de superficie adecuadamente o sobre regada. Dicha metodología ha sido incorporada a MOPECO “Modelo de Optimización Económica del Agua de Riego” (Ortega *et al.*, 2004).



Metodología

Para medir la uniformidad de distribución del agua de un sistema de riego, el coeficiente de uniformidad (CU) de Christiansen (1942) suele ser el más utilizado.

Como consecuencia de la falta de uniformidad, implícita a cualquier sistema de riego, habrá una determinada proporción del área regada que recibirá la altura requerida para que el cultivo pueda alcanzar la evapotranspiración máxima (ET_m), mientras que el resto habrá recibido una lámina inferior, y no podrá alcanzar la ET_m durante todos los días del intervalo entre riegos.

La uniformidad del rendimiento de los cultivos, cuando el agua es el único factor limitante, depende de la uniformidad del agua disponible en su zona radicular. Ésta, está condicionada por el efecto de los riegos acumulados, la interceptación del agua por parte de la cubierta vegetal y su posterior redistribución, la dinámica del agua en el suelo, y el desarrollo del sistema radicular del cultivo (Stern y Bresler, 1983; Li y Kawano, 1996; Chen *et al.*, 2004). Para el cálculo de la lámina bruta a aplicar a partir de las necesidades de agua requeridas por el cultivo, debe utilizarse la uniformidad del agua en el suelo, y no la uniformidad de aplicación de agua por el sistema de riego, incluyendo además el valor correspondiente al conjunto de riegos, al menos cuando el intervalo entre riegos es inferior a tres o cuatro días (Ortega *et al.*; 2004a y b). En sistemas fijos de riego por aspersión en maíz (Martínez 2004, de Juan *et al.*, 2008), en cebolla (Jiménez 2008, Jiménez *et al.*, 2009), y en riego con equipos pivote en remolacha azucarera (Ortiz *et al.*, 2009), ponen de manifiesto que con valores de CU $\geq 80\%$ en riegos individuales, se pueden alcanzar fácilmente uniformidades de agua en el suelo próximas al 90%.

Con el fin de estimar el efecto sobre el rendimiento de los cultivos del CU medio del agua en el suelo correspondiente al conjunto de riegos, se divide la parcela de riego en porciones iguales, discretizando así la distribución normal acumulada, con lo que la lámina de agua de riego que recibe cada porción será distinta.

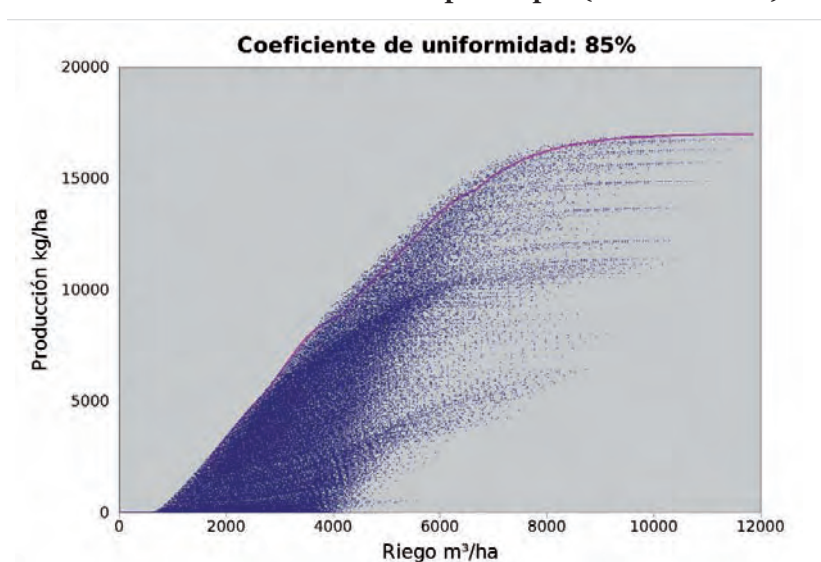
Tabla 1:

Datos económicos asociados al cultivo del maíz en el sistema agrario Mancha Oriental

Datos de maíz		Estimación de los costes variables	
		Rendimiento (kg/ha)	Costes variables (€/ha)
Precio de venta (€/ton)	142,30	17000	1451,02
Subsidios (€/ha)	346,50	13625	1318,74
Coste del agua (€/m ³)	0,09	10800	1182,74
		8300	1043,28
		0	922,30

Figura 1:

Simulación de 146410 calendarios de riego y resultados del optimizador de distribución del déficit por etapas (línea continua).



Tiene especial influencia en el riego deficitario el momento de aplicación del riego y la cuantía de cada uno de los riegos

De esta manera, cada riego es transformado en riegos diferentes para cada porción, aproximando así lo que ocurre en un riego real en la parcela. La metodología anterior permite al modelo incorporar el efecto de la uniformidad del agua disponible en el suelo sobre el rendimiento de los cultivos.

Cálculo del rendimiento del cultivo

Para estimar el rendimiento de un cultivo para un determinado nivel de déficit hídrico se utiliza la ecuación de Stewart *et al.* (1977) considerando

cuatro periodos en el proceso de crecimiento y desarrollo de los cultivos. Esta metodología es válida para la mayoría de las especies herbáceas, pudiendo obtener también un buen nivel de aproximación para algunas especies leñosas (Stewart *et al.*, 1977, Doorenbos y Kassam, 1979).

El modelo permite obtener el calendario de riegos para cada objetivo de déficit. Para ello calcula diariamente el contenido de agua en la zona radicular mediante un balance de entradas (riego, lluvia) y salidas (evapotranspiración y percolación). Puesto que es necesario trabajar con cuatro etapas del cultivo, el modelo busca la combinación de déficit por etapas que conseguiría la máxima producción para un determinado déficit global.

Para un determinado déficit objetivo, que puede ser distinto para cada una de las cuatro etapas del cultivo, el modelo establece un calendario de

riegos que trata de conseguir dicho objetivo. Una vez determinado el calendario de riegos, el modelo calcula los déficit realmente conseguidos en cada una de las etapas.

Una vez obtenidas las producciones obtenidas para cada una de las porciones, se procede a su integración para calcular la producción total obtenida.

Resultados obtenidos en cultivo de maíz

Para llevar a cabo la calibración del modelo se ha elegido un cultivo de maíz en la zona de Albacete, donde el rendimiento máximo esperado del cultivo, sin restricciones en el proceso productivo sería de 17.000 kg/ha. La **Tabla 1** muestra los datos económicos asociados al cultivo del maíz en la zona. Los datos climáticos utilizados corresponden al año 2005, que fue un año seco, con 250 mm de lluvia anual y 45 mm durante el periodo de cultivo.

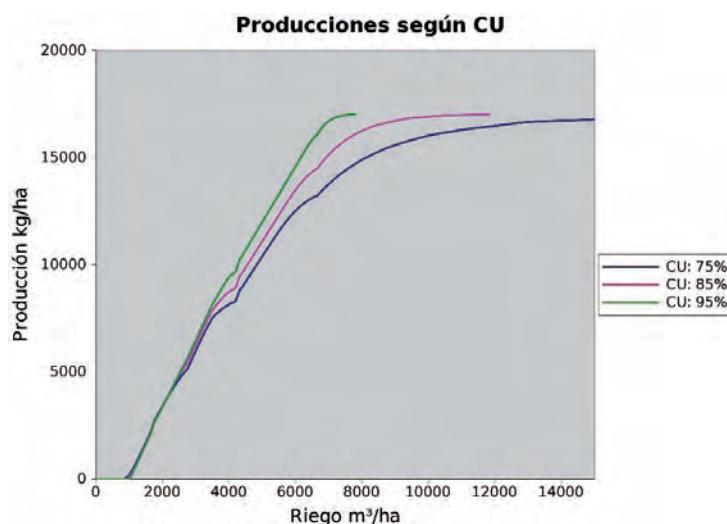
La uniformidad del rendimiento de los cultivos, cuando el agua es el único factor limitante, depende de la uniformidad del agua disponible en su zona radicular

Para una determinada dosis de riego aplicada al cultivo, pueden obtenerse diferentes producciones dependiendo del calendario de riegos utilizado. En la **Figura 1** se muestran los resultados correspondientes a 146410 calendarios de riego simulados, para un CU=85%, variando el nivel de déficit, y la proporción de área adecuadamente regada, donde se puede comprobar que para una misma aportación de agua de riego se obtienen producciones muy diferentes.

La mayor eficiencia en el uso del agua, entendida ésta como el rendimiento del cultivo por cada m³ de agua utilizado, corresponde a la envolvente superior de la nube de puntos obtenida en la **Figura 1**, al corresponder a los puntos la producción máxima para cada una de las láminas de riego brutas aplicadas. Pero simular una gran cantidad de calen-

Figura 2:

Producciones obtenidas por el optimizador de distribución del déficit por etapas para tres valores del CU del agua en el suelo (95%, 85% y 75%)



darios de riego para obtener la envolvente es muy costoso en tiempo de cálculo, por ese motivo el modelo hace uso del optimizador de déficit por etapas. Su efectividad puede comprobarse superponiendo la curva obtenida por el modelo a la nube de puntos de la simulación de 146410 calendarios de riego (**Figura 1**). El optimizador de déficit se acerca bastante a la envolvente con tiempos de cálculo pequeños. Actualmente se está trabajando en otro optimizador de déficit mucho más complejo, pero que se espera que se aproxi-

me aún más a la envolvente óptima del cultivo.

Con el fin de poner de manifiesto la influencia del CU se ha elaborado la **Figura 2**. En la misma puede verse que para un mismo déficit, se consigue mayor rendimiento cuanto mayor es el valor de CU, con la misma dosis de riego. El máximo rendimiento se obtendría sin déficit, pero no compensaría bajar de un determinado valor de déficit objetivo por el escaso incremento de rendimiento frente al gran incremento de consumo de agua que supone.

Figura 3:

Márgenes brutos obtenidos en los 146410 calendarios de riego simulados en la figura 1 junto con la envolvente resultante de aplicar el optimizador del déficit por etapas.

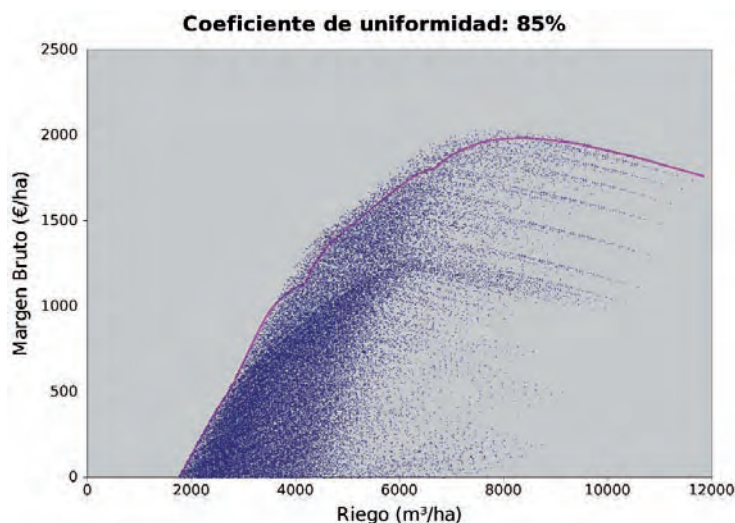
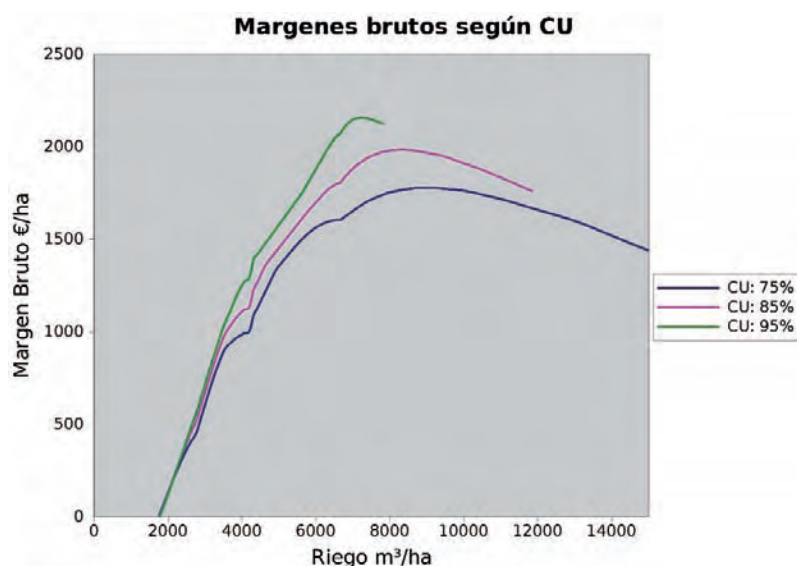


Figura 4:

Márgenes brutos obtenidos al aplicar el optimizador del déficit por etapas con valores de CU del agua en el suelo de 95%, 85% y 75%



Las envolventes obtenidas con el optimizador de déficit para los valores de CU de 95%, 85% y 75% se muestran en la **Figura 2**.

Como puede observarse en la **Figura 2** para una misma dosis de riego, el rendimiento es mayor cuanto mayor es el valor de CU, lo cual está ratificado por las experiencias de campo llevadas a cabo en la zona. Finalmente, para un mismo valor de CU, tratar de conseguir el máximo rendimiento reduce la eficiencia en el uso del agua, siendo este hecho más relevante cuanto menor es el valor de CU.

Para determinar la estrategia de riego que maximiza el margen bruto de una explotación se ha elaborado la **Figura 3**, donde puede verse el efecto tan importante que tiene la uniformidad del agua en el suelo sobre el margen bruto del cultivo.

La **Figura 3** muestra los márgenes brutos obtenidos en los 146410 calendarios de riego simulados en la **Figura 1** así como la envolvente resultante de aplicar el optimizador del déficit por etapas para un CU del agua en el suelo del 85%

En la **Figura 4** muestran los márgenes brutos obtenidos al aplicar el optimizador del déficit por etapas con valores de CU del agua en el suelo de 95%, 85% y 75%, poniendo de manifiesto la caída del margen bruto a partir de una determinada lámina de agua aplicada, así como los menores márgenes brutos obtenidos al disminuir el CU.

Para los datos económicos considerados en el cultivo (**Tabla 1**), la **Figura 4** pone de manifiesto que:

- Cuanto mayor es el valor de CU, se logra un mayor margen bruto (MB) para una misma dosis de riego, siendo menor el efecto de CU para bajas dosis de riego.
- El MB aumenta al hacerlo la dosis de riego aplicada, hasta un máximo, a partir del cual tiende a disminuir.

Calendario de riegos

Para ilustrar la importancia de un adecuado calendario de riegos, se ha elaborado la **Tabla 2**. En ella se han simulado cuatro calendarios de riego diferentes para una situación en la que el agricultor dispone de 6.500 m³/ha para riego de maíz. Se supone que se trata de un sistema fijo de riego por aspersión, que consigue un CU = 85% del agua en el suelo. El periodo de riego del maíz comprende desde mediados de mayo a primeros de septiembre.

Las cuatro estrategias de riego a comparar son:

Opción 1: baja frecuencia de riegos para tratar de reducir las pérdidas por evaporación y arrastre.

Opción 2: alta frecuencia de riegos para tratar de reducir el estrés hídrico del cultivo.

Tecnología para la post-cosecha

Limpieza y gestión de almacenaje: La base para la calidad

Transportar, almacenar, limpiar, clasificar, secar, refrigerar

Instalaciones de alto rendimiento con tecnología probada y avanzada. Schmidt-Seeger ofrece un amplio abanico de sistemas de acondicionamiento para cereales, malta, maíz, arroz, semillas oleaginosas, legumbres etcétera:

Transportadores de cinta, transportadores de cadena, transportadores sinfin, elevadores, limpiadoras aspiradoras y cribadoras de la serie TAS, secaderos, refrigeradores, triarbejones

Control de calidad permanente
Maquinaria para la permanente toma-muestras y para el control de calidad de productos granulados y que fluyen.

Schmidt Grain Management
España, S.A.
C/ Orense 39 – 5º C
28020 Madrid
Tlf.: 91 417 92 70
Fax: 91 417 92 75
schmidt@schmidt-spain.com
www.schmidt-seeger.com

Tabla 2:

Calendario de riegos para las opciones consideradas. Los calendarios 1, 2, y 3 han sido calculados por el modelo, mientras que el 4 ha sido introducido manualmente.

	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	TOTAL
ETm (mm)	61,3	110,4	228,7	243,5	78,5	722,4
Lluvia efectiva (mm)	2,1	10,1	5,8	0,0	27,5	45,4
Número de riegos						
Opción 1 (modelo)	1	5	9	7	2	24
Opción 2 (modelo)	2	9	10	10	2	33
Opción 3 (óptimo)	3	7	7	10	2	29
Opción 4 (manual)	2	8	10	10	2	32
Dosis de riego (mm)						
Opción 1 (modelo)	10,5	63,4	266,1	241,8	68,1	650,0
Opción 2 (modelo)	28,3	65,8	288,2	228,1	39,7	650,0
Opción 3 (óptimo)	34,1	65,3	223,9	285,2	42,5	650,0
Opción 4 (manual)	20,0	90,0	250,0	250,0	40,0	650,0



Opción 3: calendario óptimo, teniendo en cuenta la diferente respuesta al estrés hídrico del cultivo en las diferentes etapas de desarrollo del mismo.

Opción 4: calendario de riegos seguido normalmente por los agricultores en la zona, con intervalos entre riegos de 3 días en el periodo punta.

Las Opciones 1 y 2 son las que apli-

can el menor y el mayor número de riegos, respectivamente. Las Opciones 3 y 4 ofrecen valores intermedios en el número de riegos, aunque más cercanos a la Opción 2. En la **Tabla 3** se muestran los resultados obtenidos con cada uno de los calendarios de riego anteriores para los principales parámetros de decisión.

La Opción 3 (óptima) es la que obtiene los mejores resultados de ren-

Tabla 3:

Efecto del calendario de riegos sobre el rendimiento y el margen bruto en un cultivo de maíz

	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4
Rendimiento (kg/ha)	11742,0	12132,0	13021,0	11919,0
Margen bruto (€/ha)	1060,3	1114,2	1238,6	1084,8

dimiento y margen bruto, superando en un 9,2% al rendimiento y en un 14,2% al margen bruto del calendario de riegos normalmente seguido por los agricultores de la zona (Opción 4). La diferencia en el número de riegos entre estas dos opciones es de tan solo 3, poniendo de manifiesto la importancia de seleccionar adecuadamente el momento del riego y la dosis a aplicar en el mismo.

MOPECO es capaz de distribuir el déficit objetivo para conseguir el calendario de riegos que maximiza la producción

[Conclusiones y Recomendaciones

La modelización del efecto de la uniformidad del sistema de riego sobre el rendimiento de los cultivos bajo condiciones de déficit proporciona una mejor aproximación a la realidad del riego en parcela.

La uniformidad del agua de riego afecta notablemente al rendimiento de los cultivos y a la eficiencia en el uso del agua, lo que implica un efecto importante en el margen bruto obtenido.

Los resultados ofrecidos por el modelo pueden ser de gran ayuda a la hora de diseñar la estrategia de riego de cualquier zona regable con recursos hídricos limitados.

[Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado dentro del marco de los Proyectos Europeos FLOW-AID "Farm Level Optimal Water Management: Assistant for Irrigation under Deficit" N° 036958 (GOCE), y DeSURVEY "A Surveillance System for Assessing and Monitoring of Desertification" (SUST-DEV-CT-2004-003950-2), financiados por la UE.

[Bibliografía

Queda a disposición del lector en los correos electrónicos eulogio.lopez@uclm.es y redaccion@editorialagricola.com •