

APLICACIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN A LA EVALUACIÓN DE UNA ZONA REGABLE

I. Lorite, L. Mateos y E. Fereres

Resumen:

La mejora en la gestión del riego en las zonas regables españolas es cada día más necesaria. Para contribuir a esta tarea, se ha elaborado un modelo de simulación que permite el análisis y la evaluación del manejo del agua en la zona regable del Genil – Cabra, en la provincia de Córdoba. Con este modelo y un indicador de funcionamiento se ha logrado hacer una primera evaluación de la zona, tanto por cultivos como espacialmente. El contraste entre el agua aplicada en el riego y la dotación económicamente óptima calculada por el modelo indicó que en el año 1996/97, la zona se regó deficitariamente, aplicándose algo menos de la mitad (45%) de los requerimientos óptimos calculados. El análisis espacial ha posibilitado determinar zonas en donde el aporte de agua por parte del agricultor está más próximo a las necesidades óptimas de los cultivos.

Palabras clave: modelo, gestión, indicador de funcionamiento, zonas regables.

INTRODUCCIÓN

De todas las actividades humanas, el regadío es el principal consumidor de agua, particularmente en las zonas áridas y semiáridas. De acuerdo con estimaciones realizadas en los planes hidrológicos de cuenca, el 68% de la demanda hídrica en España corresponde a los riegos (Ministerio de Medio Ambiente, 1998). Esta alta demanda hace pensar que la disponibilidad de agua para riego se reducirá de forma significativa en el futuro debido a la escasez del recurso y al incremento de las demandas provenientes de otros sectores tales como el turístico, recreativo, medioambiental y urbano.

Una forma de contribuir a la mejora en la eficiencia en el uso del agua en España consiste en avanzar en la mejora en el manejo del riego y en la modernización y rehabilitación de las zonas regables españolas. Tanto en el Libro Blanco del Agua en España (Ministerio de Medio Ambiente, 1998), como en el Plan Nacional de Regadíos (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1998) se ha puesto especial énfasis en la necesidad de modernizar y rehabilitar

nuestros regadíos, pero se precisa muy poco acerca de cómo mejorar el manejo del agua en la agricultura de riego.

Para mejorar la gestión del agua es necesario desarrollar y usar herramientas para el análisis y evaluación del funcionamiento de las zonas regables. La simulación utilizando modelos hidrológicos se ha demostrado útil para llevar a cabo esta tarea. Han sido muchos los modelos empleados para simular los diferentes componentes del ciclo hidrológico en la agricultura de riego, desde los funcionales (Doorenbos y Pruitt, 1977; Doorenbos y Kassam, 1979; Allen et al., 1998), hasta los mecánicos (Abbott et al., 1986; van Aelst et al., 1988; Williams et al., 1989). Recientemente se han combinado con los modelos de simulación, técnicas tales como la teledetección (Roberts et al., 1992; Shih y Jordan, 1993; D'urso et al., 1999; Kite, 2000; Kite y Droogers, 2000) y los sistemas de información geográfica (SIG) (Calixte et al., 1992; Lal et al., 1993; Mallawaarachchi et al., 1996; Beinroth et al., 1998; Hartkamp et al., 1999) que facilitan la adquisición de información y el análisis espacial.

Universidad de Córdoba e Instituto de Agricultura Sostenible (C.S.I.C). Apto. de correos 4084, 14080, Córdoba.
Telf. 957499231 E-mail: ir2lotoi@uco.es. Telf. 957499228 E-mail: ag1mainl@uco.es. Telf. 957499229 E-mail: ag1fecae@uco.es

Artículo recibido el 12 de junio de 2002, recibido en forma revisada el 5 de noviembre de 2002 y aceptado para su publicación el 4 de marzo de 2003. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

Los modelos de simulación se han utilizado para desarrollar herramientas aplicadas a analizar la gestión de las zonas regables (Prajamwong et al., 1995). Para ello ha sido necesario integrar modelos simples de balance de agua, de producción de cultivos, de circulación en la red y hasta herramientas para la administración de la zona regable. Complementariamente al análisis del manejo del agua, los modelos de simulación se han empleado para generar y evaluar escenarios hipotéticos, que incluyen diversas situaciones que podrían ocurrir en el futuro, tales como diferentes condiciones climáticas, diferente distribución de cultivos, etc. (Engel et al., 1997; Gilot et al., 1997; Droogers et al., 2000).

La cuantificación de la calidad del funcionamiento de las zonas regables se realiza utilizando indicadores que permiten valorar las prácticas de riego en una zona en lo referente a eficiencia del riego y a la productividad del agua (Molden y Gates, 1991; Kalu et al., 1995; Malano y Burton, 2000). Estos indicadores también han sido aplicados para evaluar la evolución de una zona regable a lo largo del tiempo (Sarma y Rao, 1997; Dechmi et al., 1999; Droogers et al., 2000; Droogers y Kite, 1999); para comparar el funcionamiento de distintas zonas regables (Burt y Styles, 1999); para la optimización de los recursos (Molden y Gates, 1991) y para la determinación de una solución de compromiso entre la equidad y la eficiencia en el reparto del agua dentro de una zona regable (Kalu et al., 1995).

Este trabajo describe la elaboración de un modelo de simulación y su utilización en la evaluación cuantitativa de la gestión de una zona regable. La zona regable seleccionada para este estudio ha sido la zona del Genil – Cabra, colectividad de Santaella, situada en la provincia de Córdoba. Dicha zona ha sido elegida debido a la posibilidad de obtención de información de consumos de agua individuales y sobre la distribución de cultivos detallada por parcela. Otra razón para su selección ha sido la ausencia de limitaciones en la distribución del agua, por lo que el análisis se puede centrar en el manejo del riego por parte de los agricultores.

MÉTODOS

Descripción y caracterización de la zona

La zona regable del Genil – Cabra (ZRGC) está ubicada en el término municipal de Santaella, provincia de Córdoba, (4° 51' W, 37° 31' N).

En la actualidad, la zona regable comprende 15.068 ha distribuidas por las provincias de Córdoba (términos municipales de Santaella, Puente Genil, Montilla, Montalbán y Aguilar de la Frontera) y en menor medida Sevilla (Estepa). En concreto, el estudio se ha centrado en los sectores VIII, IX, X y XI de la ZRGC. Estos sectores tienen una superficie total de 7.244 ha de las cuales 6.172 ha se regaron durante la campaña 1996/97, objeto de este estudio.

La puesta en funcionamiento de la comunidad de regantes tuvo lugar en la campaña 1990/91, aunque no de una manera totalmente operativa. Así, en este año se comenzó con una superficie regada de 2.700 ha que se han ido incrementando paulatinamente hasta alcanzar la superficie actual en la campaña 1994/95.

El clima de la zona es Mediterráneo continental con una precipitación media anual de 606 mm y un periodo seco y caluroso durante el verano. La temperatura media oscila entre los 10 °C en invierno y los 27 °C en verano. Los suelos predominantes son vertisoles y suelos de origen aluvial.

Los cultivos más abundantes en la zona son cereales de invierno, girasol y algodón. Otros cultivos presentes en la zona son el ajo, olivar, remolacha, habas, maíz, espárragos y otros cultivos hortícolas.

La zona cuenta con un moderno sistema de distribución de agua de riego a presión en tubería enterrada, el cual permite realizar un suministro a la demanda, proporcionando flexibilidad en la frecuencia, cantidad y duración del riego al agricultor. El caudal instantáneo de proyecto fue de 2 l/s/ha, aunque en la actualidad y debido a la infrautilización del sistema, este valor puede ser superado hasta en un orden de magnitud. El método de aplicación más común es el de aspersión con desplazamiento manual, aunque en el olivar aparece una gran superficie con riego por goteo. Aproximadamente 2.600 ha son regadas por medio de una red ramificada cuya presión se consigue por diferencia de cotas entre el punto de origen y las parcelas. La superficie restante (4.400 ha) es abastecida por una red ramificada con presión suministrada por una estación de bombeo. Ambas redes tienen su origen en la estación de puesta en carga de San José, donde el agua es filtrada y suministrada. El precio del agua fue de 0.02 €/m³ y el coste de aplicación de cada riego de 27.13 €/ha.

La zona regable está dividida en agrupaciones. Cada agrupación está compuesta por una o varias parcelas dependiendo de la superficie. La red con bombeo suministra agua a 44 agrupaciones mientras que la red de gravedad suministra agua a las 39 agrupaciones restantes. La zona posee tres tipos de puntos de control del agua del sistema. El primer tipo se encuentra en las tomas de parcela. Usa un contador de paso total, un limitador de caudal y un limitador de presión. El segundo tipo de control se encuentra al comienzo de cada agrupación y está dotado de un caudalímetro, de un limitador de caudal y un regulador de presión. El tercer tipo de control se encuentra en la estación de bombeo de San José y en la estación de bombeo principal situada en el embalse de Cordobilla. Toda la zona cuenta con un sistema de telecontrol y telemando que facilita la vigilancia de las redes y el suministro de agua.

Los contadores de parcela se leen varias veces durante la estación de riego. De dichas lecturas puede determinarse el consumo de agua por parcela.

Junto a esta información, los mapas de suelos y el parcelario fueron proporcionados por el gerente de la zona regable. Se emplearon valores aproximados de uniformidad de aplicación en función del método de riego y el marco empleados en la zona. La información meteorológica necesaria para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0 ; Allen et al., 1998), fue obtenida de una esta-

ción meteorológica situada en la zona regable. Para la campaña 1996/97 la lluvia recogida fue de 729 mm y la ET_0 de 1.301 mm. El método de riego de cada parcela se determinó en visitas de campo.

Para conocer con más detalle las prácticas de manejo del riego, se realizaron entrevistas personales con el gerente de la ZRGC y otros técnicos, y se envió una encuesta detallada a la totalidad de los agricultores (la cual fue contestada completamente por aproximadamente el 10% de los mismos). De dicho trabajo se obtuvieron valores de frecuencia y duración del riego. Por las mismas vías, se obtuvo información relativa a la fecha de siembra empleada en cada parcela. Para extrapolar esta información sobre fecha de siembra a la totalidad de las parcelas, se utilizó una distribución aleatoria de acuerdo a una distribución normal alrededor de los valores medios registrados.

Modelo de simulación

Para el análisis del manejo del riego dentro de la zona regable, se construyó un modelo de simulación del proceso del riego. Inicialmente esta herramienta ha sido realizada para la zona regable del Genil – Cabra, aunque es aplicable a cualquier zona regable donde esté disponible la información necesaria. El modelo está compuesto por submodelos que calculan los componentes del balance de agua de cada parcela regada y evalúan los efectos sobre los cultivos del déficit hídrico.

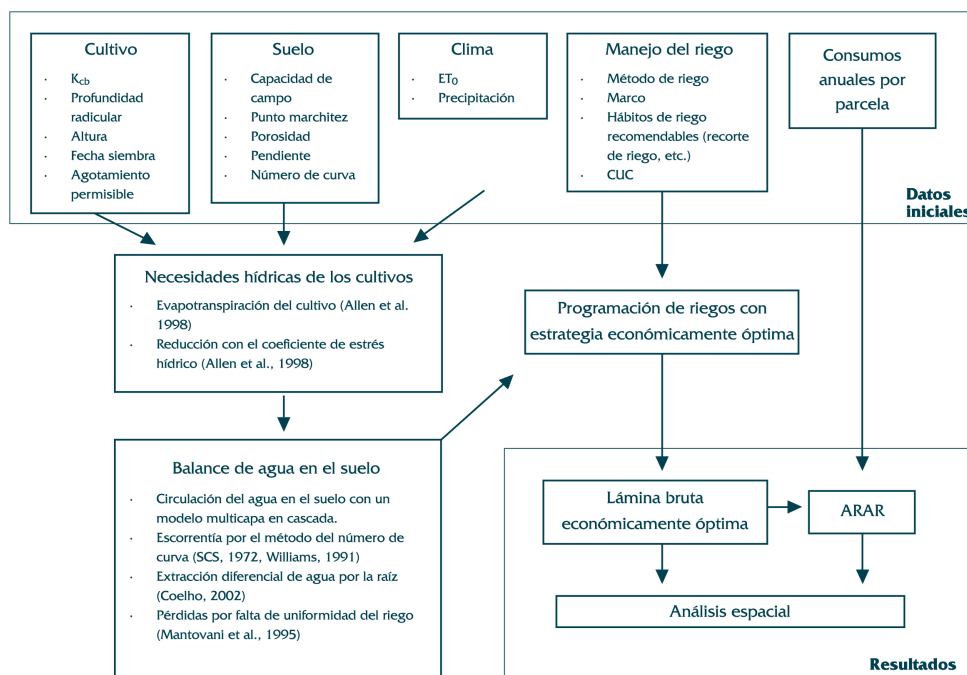


Figura 1. Diagrama de flujo del modelo de simulación realizado.

El modelo proporciona resultados diarios de los componentes del balance de agua en el suelo para cada parcela, genera un calendario económicamente óptimo de riego, y permite comparar esta información con el calendario de riegos empleado realmente por los regantes.

En la Figura 1 se muestra un diagrama de flujo con la información necesaria para utilizar el modelo, los componentes del mismo y los resultados obtenidos.

Evapotranspiración

Las necesidades hídricas se calcularon siguiendo el procedimiento descrito por Allen et al. (1998) y Allen (2000):

$$ET_c = (K_s \cdot K_{cb} + K_e) \cdot ET_0 \quad (1)$$

donde ET_0 es la evapotranspiración de referencia diaria que ha sido calculada usando la ecuación de Penman-Monteith, K_{cb} es el coeficiente de cultivo basal y K_s es un coeficiente de estrés hídrico. Además, el modelo estima la evaporación desde el suelo evaluando la energía disponible en la superficie del suelo, lo que se calcula a través del coeficiente K_e :

$$K_e = K_r \cdot (K_{c \max} - K_{cb}) \quad (2)$$

donde K_r es un coeficiente adimensional dependiente del déficit de agua en la capa superficial del suelo y $K_{c \max}$ es el valor máximo de K_c tras una lluvia o riego. El valor de K_e no puede ser superior a $f_{ew} \cdot K_{c \max}$, donde f_{ew} es la fracción de suelo que tanto está expuesto al sol como mojado.

El modelo reduce la transpiración potencial del cultivo usando el coeficiente de estrés hídrico K_s . Este coeficiente afecta al coeficiente de cultivo basal cuando el contenido medio de agua en la zona radicular no es el adecuado para soportar la transpiración potencial de la planta (Allen et al., 1998).

$$K_s = \frac{CAP - D_r}{(1 - AP) \cdot CAP} \quad (3)$$

donde CAP es la capacidad de almacenamiento de agua en la zona radicular, D_r es el déficit de agua en la zona radicular y AP es la fracción de CAP que puede ser agotada antes de que se reduzca la transpiración. Si $D_r < AP \cdot CAP$, el valor K_s será igual a 1.

Balance de agua en el suelo

El balance de agua en el suelo se realiza a intervalos diarios mediante un modelo que divide la zona radicular en múltiples capas. Las entradas al sistema son la lluvia y el riego. Las salidas del sistema son la transpiración del cultivo, la evaporación desde el suelo, la escorrentía superficial y la filtración profunda.

Para cada una de las parcelas y cultivos de la zona el balance de agua se inicia el 1 de septiembre. En esa fecha, salvo en los cultivos con riego por goteo, se considera que el perfil está seco. Desde ese momento, el modelo considera todos los factores que afectan al balance de agua en el suelo.

La escorrentía se calcula para cada lluvia diaria utilizando el método del número de curva (Soil Conservation Service, 1972), incluyendo un ajuste para expresar los efectos de la pendiente y la humedad del suelo sobre la escorrentía (Williams, 1991). Se supone que el riego no produce escorrentía.

La extracción de agua del suelo por los cultivos no es uniforme a lo largo del perfil del suelo, ya que depende de la densidad radicular y del contenido de agua en cada capa del suelo (Taylor, 1983). Para calcular esta extracción por capas, se considera el porcentaje de raíces y el contenido de humedad en cada capa. Combinando ambos factores, el agua requerida para la transpiración del cultivo se obtiene de todo el perfil del suelo (Coelho, 2002).

El perfil se divide en capas de 10 cm de espesor hasta alcanzar la máxima profundidad radicular del cultivo. Cuando el contenido de agua de una capa sobrepasa la capacidad de campo, el exceso se mueve a la capa situada debajo de ella, en un proceso similar a una cascada. Cuando la última capa al final de la zona radicular se llena, el exceso se considera filtración profunda, al quedar fuera del alcance de las raíces.

Al calcular las necesidades de riego en una parcela, la falta de uniformidad de los aspersores y goteros hace que sea necesario incrementar la cantidad aportada al cultivo para aplicar a toda el área la dosis neta requerida (Wu, 1988; Anyoji y Wu, 1994). Para estimar la cantidad total de agua descargada por el sistema de riego se ha supuesto una distribución uniforme (Mantovani et al., 1995). La cuantía de ese incremento ha sido la que conduce a un óptimo económico y dependerá de la uniformidad del riego, del cultivo, del precio del agua y del precio de la cosecha (Wu, 1988).

Como consecuencia de esta falta de uniformidad se producen pérdidas por filtración profunda que el modelo calcula empleando la cantidad bruta de agua aplicada, la requerida y el Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC), específico de cada sistema de aspersión o goteo.

Programación de riegos

El submodelo que programa los riegos para cada parcela calcula el momento de aplicación cuando el contenido de humedad en la zona radicular alcanza un valor umbral por debajo del cual se producen déficits hídricos que reducen la producción de los cultivos. Los valores umbrales para los distintos cultivos se tomaron de Allen et al. (1998) modificados según las condiciones locales (F. Orgaz, comunicación personal). La estrategia así seguida se denomina económicamente óptima. En ella, el riego es aplicado en el momento adecuado para evitar que el cultivo sufra estrés y con la dosis óptima desde un punto de vista económico (Wu, 1988). Adicionalmente se han incluido prácticas recomendables de riego comunes en la zona, como el corte del riego al final del ciclo del cultivo (en algodón) o la aplicación de un primer riego anterior a la siembra (en ajo, maíz, remolacha y otros cultivos menos frecuentes) (F. Orgaz, comunicación personal).

Consideraciones espaciales

En el estudio de una zona regable, especialmente cuando la superficie de la misma es grande y se requiere realizar un análisis espacial, la cantidad de información a considerar hace necesario el uso de sistemas de información geográfica (SIG) que posibilitan la tarea de unión entre la información alfanumérica (que contiene la información referida a las parcelas, suelos, hábitos de riego de los agricultores etc.) y la gráfica (límites de parcelas, superficies, etc.)

Al integrar toda esta información es habitual encontrar diferentes tipos de suelos dentro de la misma parcela. Esto genera la existencia de varias subparcelas con características heterogéneas dentro de la parcela real. Tanto para el almacenamiento como para la realización de este análisis espacial se han empleado SIG tales como ARC/INFO y ARC/VIEW.

Una vez definidas estas subparcelas, el modelo de simulación previamente expuesto se aplica a cada una de ellas. Los resultados obtenidos son agregados considerando cada una de las subparce-

las que componen cada parcela real, ponderado por la superficie de cada subparcela. Esta agregación es necesaria debido a que los consumos realizados por cada agricultor han sido obtenidos por parcelas reales. Una vez realizada esta agregación se vuelven a aplicar sistemas como ARC/VIEW para la realización del análisis espacial.

Indicadores de funcionamiento relacionados con el manejo del agua

Para evaluar el manejo del riego realizado por los agricultores de la zona regable se utiliza un índice que relaciona el riego aportado por parte del agricultor con el consumo óptimo del cultivo. Este índice se conoce como Aporte Relativo Anual de Riego y se define como:

$$ARAR = \frac{\text{Volumen anual de riego aportado}}{\text{Volumen anual de riego demandado por el cultivo}} \quad (4)$$

y relaciona el volumen distribuido a los usuarios durante la campaña de riego con el volumen de agua de riego necesario, calculado mediante el modelo de simulación, que evita un estrés indeseable en los cultivos a lo largo de su ciclo de crecimiento.

Este índice, junto a una serie de indicadores para la evaluación comparativa del riego y el drenaje, ha sido empleado en varias publicaciones, siendo Malano y Burton (2000) quienes lo definieron del modo en que aquí se ha expuesto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la campaña analizada, 1996/97, los cultivos más frecuentes fueron cereales de invierno, girasol y algodón, que representaron el 29.2%, 18.6% y 18.1% del área regada respectivamente. La distribución espacial de los cultivos más frecuentes se muestra en la Figura 2. Se comprueba cómo en las parcelas de mayor tamaño es común encontrar cultivos tradicionales de secano como los cereales de invierno y el girasol.

Hay parcelas en las que el agricultor cultivó dos o más cultivos. En estos casos, aunque el área de cada cultivo es conocida, la distribución del agua entre los cultivos realizada por el agricultor es desconocida. Para superar esta circunstancia, se analizaron previamente las parcelas en las que únicamente se produjo un cultivo. En estas parcelas se determinó el consumo medio para cada cultivo.

En aquellas parcelas con más de un cultivo se utilizó dicho consumo medio para asignar a cada cultivo la parte proporcional del agua consumida según el contador. Las parcelas donde se regó más de un cultivo desde un único contador fueron el 28% del total de la zona. De igual modo aparecen parcelas en las cuales se cultivó un segundo cultivo tras el primero. La detección de estas parcelas se realizó analizando los consumos estacionales frente a los ciclos de los cultivos. Estas parcelas representaron aproximadamente el 4% de las parcelas de la zona. Tanto en un caso como en el otro, estas parcelas no fueron consideradas para la obtención del valor medio del índice ARAR, si bien se consideraron para el análisis espacial.

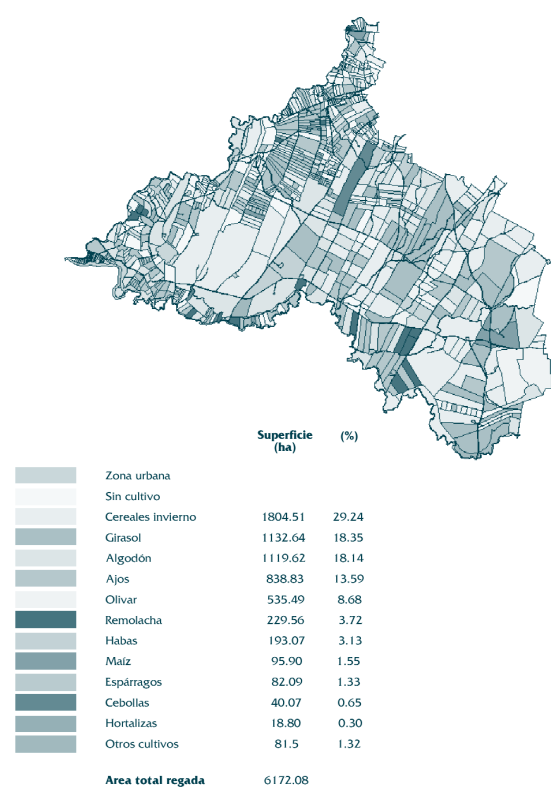


Figura 2. Mapa de cultivo más frecuente en cada parcela de la zona estudiada dentro de la zona regable del Genil - Cabra para la campaña 1996/97.

Con las medidas de los contadores individuales situados en cada parcela se realizó el mapa de consumos (Figura 3). Del análisis de este mapa se comprueba que existe una correlación entre los consumos y el mapa de cultivos, correspondiendo las parcelas con menor consumo a cultivos como cereales de invierno, girasol u olivar.

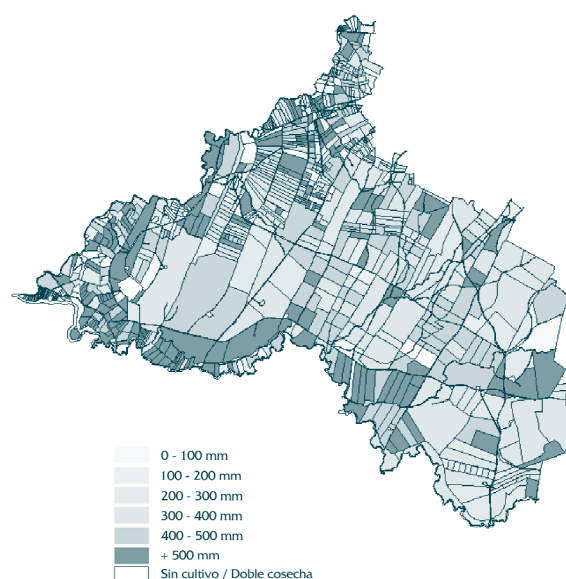


Figura 3. Consumo total en mm de cada una de las parcelas para la campaña 1996/97.

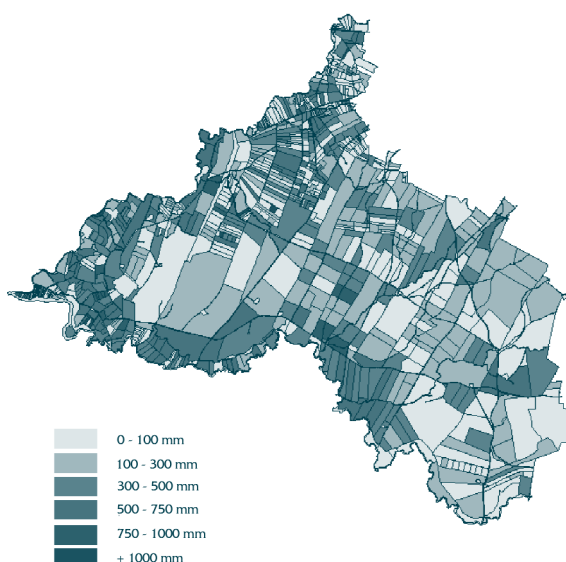


Figura 4. Requerimientos de agua (en mm) de cada parcela según el calendario económicamente óptimo realizado por el modelo de simulación para la campaña 1996/97.

Tabla 1. Valores medios y valor de la moda del índice ARAR para los cultivos más importantes de la zona durante la campaña de riego 1996/97. Además, se muestra la desviación típica del valor observado.

Period	Olivar	Girasol	Cereales Inv.	Remolacha	Algodón	Ajo
Media	0.33	0.29	0.24	0.55	0.75	0.70
Moda	0.07	0.10	0.06	0.54	0.83	0.80
SD	0.25	0.36	0.17	0.24	0.25	0.29

El modelo de simulación se aplicó a la campaña de riegos analizada, generando un calendario de riegos óptimo para cada una de las parcelas que componen la zona regable. Ello permitió calcular los requerimientos óptimos por cada parcela, tal y como se muestra en la Figura 4.

Como se puede comprobar en la Figura 4, la mayoría de las demandas óptimas de las parcelas se sitúan entre 250 y 600 mm. Las parcelas con requerimientos óptimos mayores frecuentemente presentan cultivos con alta demanda de agua como maíz o forraje, mientras que los menores requerimientos pertenecen a parcelas dedicadas a cereales de invierno y girasol.

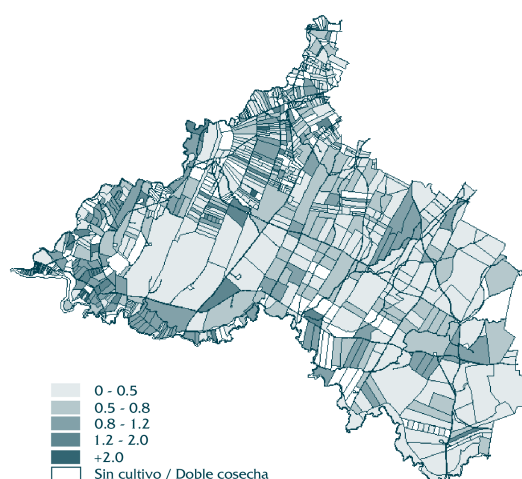


Figura 5. Mapa de la zona regable del Genil - Cabra, en el que se representa el índice relativo anual de suministro de riego (ARAR) para la campaña 1996/97.

Utilizando los consumos reales y los requerimientos óptimos se calculó el índice ARAR en cada una de las parcelas. El valor medio ponderado del índice ARAR para toda la zona regable resultó claramente inferior a 1. En concreto el valor medio de la zona fue 0.45, lo cual implica que la zona se riega deficitariamente, aplicándose algo menos de la mitad de los requerimientos de riego. Se observaron grandes diferencias entre los valores del ARAR para los cultivos más importantes de la zona, tal y como se muestra en la Tabla 1.

Los cultivos con menor valor del índice ARAR fueron el olivar, el girasol y los cereales de invierno. En el lado opuesto se encuentran el ajo y el algodón, en los cuales la cantidad de agua aplicada se aproxima a la cantidad óptima calculada por el modelo. La Figura 5 muestra la distribución espacial del índice ARAR en la zona regable para la campaña estudiada.

Estudios realizados en otras zonas regables españolas muestran valores superiores del índice ARAR a los encontrados en ZRGC. Así, Faci et al. (2000) en una zona regable con riego por superficie en Huesca, encontró un valor medio del índice de 1.43. En una zona regable próxima con riego por aspersión, en Zaragoza, Dechmi et al. (1999) halló valores de ARAR inferiores a la unidad aunque también mayores a los encontrados en ZRGC (0.73 para girasol y 0.98 para trigo). Por último, en zonas regables más alejadas, Burn y Styles (1999) también encontraron valores de ARAR superiores a los encontrados en ZRGC, alcanzándose en algunas zonas valores superiores a 2.

A la hora de estudiar la distribución espacial del índice ARAR, es importante tener en cuenta que en la zona no ha existido ningún tipo de limitación en el suministro. Aunque la distribución del índice ARAR no presenta un patrón claro, sin embargo, se puede apreciar un incremento en el índice en la zona oeste de la zona regable (cerca del núcleo de población de La Montielia) y en las zonas cercanas al arroyo del Salado y al río Cabra, que delimitan la zona regable. En estas zonas se encuentran gran cantidad de explotaciones familiares de tamaño reducido dedicadas a algodón y hortalizas, cultivos con alto ARAR, y posiblemente con tradición de riego más antigua que el resto de la zona. Por el contrario se observa cómo en las parcelas grandes (situadas en la parte central y este de la zona regable) el índice ARAR presenta valores inferiores debido a la presencia en las mismas de varios cultivos (entre ellos cereales de invierno, girasol u olivar) que reducen el valor medio del índice en éstas, circunstancia que no ocurre en las parcelas de menor tamaño con un único cultivo.

Se analizaron las posibles relaciones entre la superficie de la parcela y el índice ARAR.

Un primer análisis constató que el área de las parcelas prácticamente no influía sobre el índice ARAR, si bien se observó como en las parcelas de gran tamaño, con superficie mayor de 20 ha, el ARAR nunca superaba el valor de 1, mientras que en el 17.5% de las parcelas de menor tamaño el ARAR fue mayor que 1. Este mismo análisis se realizó para cada uno de los cultivos más comunes de la zona, si bien no se han apreciado tendencias concretas. Así, aparecen grandes diferencias en el índice ARAR para parcelas con similar superficie en todos los cultivos analizados.

CONCLUSIONES

El modelo aquí expuesto se ha mostrado como una herramienta útil para la simulación del riego de una zona regable. Con la inclusión de modelos simples se ha logrado simular la mayoría de los procesos que ocurren dentro de una zona regable.

Como primera conclusión se obtiene que la zona se regó en 1996/97 de forma deficitaria, si bien hay diferencias muy notables entre cultivos. La causa principal de esto es la gran cantidad de superficie destinada a cultivos como el girasol o el trigo, cultivos tradicionalmente de secano y en los cuales, la actual Política Agraria Común de la Unión Europea no ofrece incentivos para regarlos de forma óptima.

La inclusión de un análisis espacial permitió la determinación de áreas en donde por diferentes causas (menor experiencia en manejo del riego, distribución de cultivos, etc.) la aplicación del riego es deficiente, posibilitando una actuación sobre las mismas. De igual modo, se determinan las zonas en donde el agua aplicada por los agricultores es más próxima a las necesidades óptimas de los cultivos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren agradecer la ayuda e interés mostrado por el gerente de la zona regable del Genil – Cabra, D. José Berlanga Mercado, así como el asesoramiento del Dr. F. Orgaz, IAS-CSIC.

ET_c	Evapotranspiración del cultivo
K_s	Coefficiente de estrés hídrico
K_{cb}	Coefficiente de cultivo basal
K_e	Coefficiente de evaporación desde el suelo
ET_0	Evapotranspiración de referencia
K_r	Coefficiente adimensional dependiente del déficit de agua en la capa superficial del suelo

K_c^{max}	Valor máximo de K_c tras una lluvia o riego
f_{ew}	Fracción de suelo que está expuesto al sol y mojado
CAP	Capacidad de almacenamiento de agua en la zona radicular
D_r	Déficit de agua en la zona radicular
AP	Fracción de CAP que puede ser agotada antes de que se reduzca la transpiración

REFERENCIAS

- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. y Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European hydrological system – Systeme hydrologique europeen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. *J. Hydrol.* 87, 61-77.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Roma, Italia.
- Allen, R.G. (2000). Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *J. Hydrol.* 299, 27-41.
- Anyoji, H y Wu, I.P. (1994). Normal distribution water application for drip irrigation schedules. *Trans. ASAE* 37, 159-164.
- Beinroth, F.H., Jones, J.W., Knapp, E.B., Papajorgji, P. y Luyten, J. (1998). Evaluation of land resources using crop models and a GIS. En *Understanding options for agricultural production*. G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom y P.K. Thornton, eds. Kluwer Academic Publishers. Gran Bretaña., 293-311.
- Burt, C.M. y Styles, S.W. (1999). Modern water control and management practices in irrigation. Impact on performance. *Water Reports* 19. FAO. Roma. Italia.
- Calixte, J.P., Beinroth, F.H., Jones J.W. y Lal H. (1992). Linking DSSAT to a Geographic Information System. *Agrotechnology Transfer* 15, 1-7.
- Coelho M.B., Villalobos, F.J., Mateos, L. (2002). Modeling root growth and the soil-plant-atmosphere continuum of cotton crops. *Agric. Water Manage.* (En prensa).
- Dechmi, F., Playán, E. y Faci, J.M. (1999). Estudio de los factores que determinan el uso del agua en el polígono de la loma de Quinto de Ebro. XV Congreso Nacional de Riegos. AERYD 227-234.
- Doorenbos, J. y Kassam, A.H. (1979). Yield response to water. *Irrigation and Drainage Paper* 33. FAO. Roma. Italia.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W.O. (1977). Crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper* 24. FAO. Roma. Italia.
- Droogers, P. y Kite, G. (1999). Water productivity from integrated basin modeling. *Irrigation and Drainage Systems* 13, 275-290.

- Droogers, P., Kite, G. y Murray-Rust, H. (2000). Use of simulation models to evaluate irrigation performance including water productivity, risk and system analyses. *Irrigation Sci.* 19, 139-145.
- D'urso, G., Menenti, M. y Santini, A. (1999). Regional application of one-dimensional water flow models for irrigation management. *Agric. Water Manage.* 40, 291-302.
- Engel, T., Hoogenboom, G., Jones, J.W. y Wilkens, P.W. (1997). AEGIS/WIN: A computer program for the application of crop simulation models across geographic areas. *Agron. J.* 89, 919-928.
- Faci, J.M., Bensaci, A., Slatni, A. y Playán, E. (2000). A case study for irrigation modernisation. I. Characterisation of the district and analysis of water delivery records. *Agric. Water Manage.* 42:313-334.
- Gilot, L., Calvez, R., Le Goulven, P. y Ruf, T. (1997). Evaluating water delivery in tertiary units. Part 2: A case study, Urcuqui, a farmer-managed irrigation system in the Andes. *Agric. Water Manage.* 32, 163-179.
- Hartkamp, A.D., White, J.W. y Hoogenboom, G. (1999). Interfacing Geographic Information Systems with Agonomic Modeling: A Review. *Agron. J.* 91, 761-772.
- Kalu, I.L., Paudyal, G.N. y Gupta, A.D. (1995). Equity and efficiency issues in irrigation water distribution. *Agric. Water Manage.* 28, 335-348.
- Lal, H., Hoogenboom, G., Calixte, J-P., Jones, J.W. y Beinroth, F.H. (1993). Using crop simulation models and GIS for regional productivity analysis. *Trans. ASAE* 36(1), 175-184.
- Malano, H. y Burton, M. (2000). Guidelines for benchmarking performance in the irrigation and drainage sector. IPTRID Secretariat. FAO. Roma. Italia.
- Mallawaarachchi, T., Walker, P.A., Young, M.D., Smyth, R.E. y Lynch, H.S. (1996). GIS-based integrated modelling systems for natural resource management. *Agric. Syst.* 50, 169-189.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1998. Plan Nacional de Regadíos (Horizonte 2007). MAPA. Madrid, 229p.
- Mantovani, E.C., Villalobos, F.J., Orgaz, F. y Fereres, E. (1995). Modelling the effects of sprinkler irrigation uniformity on crop yield. *Agric. Water Manage.* 27, 243-257.
- Ministerio de Medio Ambiente (1998). El Libro Blanco del Agua en España. MIMAM. Madrid, 855p.
- Molden, D.J. y Gates, T.K. (1990). Performance measures for evaluation of irrigation-water-delivery systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 116(6), 804-823
- Prajamwong, S., Merkle, G.P. y Allen, R.G. (1997). Decision support model for irrigation water management. *J. Irrig. Drain. Eng.* 123(2), 106-113.
- Roberts, G., France, M. y Robinson, M. (1992). Computing the water balance of a small agricultural catchment in southern England by consideration of different land-use types. I. Land classification using remotely-sensed imagery. *Agric. Water Manage.* 21, 145-154.
- Shih, S.F. y Jordan, J.D. (1991). Use of Landsat thermal-IR data and GIS in soil moisture assessment. *J. Irrig. Drain. Eng.* 119(5), 868-879.
- Soil Conservation Service (1972). National engineering handbook, USDA-SCS, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Sarma, P.B.S. y Rao, V.V. (1997). Evaluation of an irrigation water management scheme – a case study. *Agric. Water Manage.* 32, 181-195.
- Taylor H.M. (1983). Managing root systems for efficient water use: An overview. Capítulo 3^a en Limitations to Efficient Water Use in Crop Production. H.M. Taylor, W.R. Jordan y T.R. Sinclair, eds., ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin, 87-113.
- Van Aelst, P.V., Ragab, R.A., Feyen, J. y Raes, D. (1988). Improving irrigation management by modelling the irrigation schedule. *Agric. Water Manage.* 13, 113-125.
- Williams, J.R., Jones, C.A., Kiniry, J.R. y Spaniel, A. (1989). The EPIC Crop Growth Model. *Trans. ASAE* 32, 497-511.
- Williams, J.R. (1991). Runoff and water erosion. Capítulo 18 en Modeling Plant and Soil Systems. J. Hanks y J.T. Ritchie, eds., ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin, 439-455.
- Wu, I.P. (1988). Linearized water application function for drip irrigation schedules. *Trans. ASAE* 31, 1743-174.