



**Evaluación del riego de la zona  
regable del Genil-Cabra  
(Santaella, Córdoba): índices  
de calidad del riego.  
(accésit)**

Ignacio Lortie Torres

V Premio Unicaja de Investigación sobre desarrollo  
económico y estudios agrarios





**Evaluación del riego de la zona  
regable del Genil-Cabra  
(Santaella, Córdoba): índices  
de calidad del riego.  
(accésit)**

Ignacio Lorite Torres

V Premio Unicaja de Investigación sobre desarrollo  
económico y estudios agrarios

*Reunidos en la Ciudad de Sevilla el día 5 de Mayo de 2003 un jurado presidido por Braulio Medel Cámara y compuesto por Carmen Hermosín Gaviña, José Javier Rodríguez Alcaide, José Emilio Guerrero Ginel y Francisco Villalba Cabello, decidió por unanimidad conceder a esta investigación un Accésit del V PREMIO UNICAJA DE INVESTIGACIÓN SOBRE DESARROLLO ECONÓMICO Y ESTUDIOS AGRARIOS. El premio fue convocado por Analistas Económicos de Andalucía en el otoño de 2002 y cuenta con el patrocinio de la Fundación UNICAJA.*

## **Evaluación del riego de la zona regable del Genil - Cabra (Santaella, Córdoba): índices de calidad del riego**

**Equipo de Investigación y Edición**

**Investigación** Ignacio Lorite Torres

**Coordinación  
Gráfica y Administración** M<sup>a</sup> Dolores Fernández-Ortega Jiménez  
Rosa Díaz Montañez

**Proyecto,  
Realización,  
Coordinación  
y Edición**



## Producción

### **Analistas Económicos de Andalucía**

C/ Ancla, nº 2 - 6ª planta. 29015 MÁLAGA

Tel.: 952 22 53 05 - 06

Fax: 952 21 20 73

e-mail: [aea@unicaja.es](mailto:aea@unicaja.es)

[www.analistaseconomicos.com](http://www.analistaseconomicos.com)

D.L.: MA-1244-2003

I.S.B.N.: 84-95191-63-6

La responsabilidad de las opiniones emitidas en este documento corresponde exclusivamente a los autores que no son, necesariamente, las de UNICAJA o Analistas Económicos de Andalucía.

Reservados todos los derechos. Queda prohibido reproducir parte alguna de esta publicación, su tratamiento informático o la transcripción por cualquier medio, electrónico, mecánico, reprografía y otro sin el permiso previo y por escrito del editor.

© Analistas Económicos de Andalucía.

*A mi esposa Eva*

**Evaluación del riego de la zona regable del Genil – Cabra (Santaella, Córdoba): índices de calidad del riego**

**Índice**

|               |   |           |
|---------------|---|-----------|
|               | <b>PRESENTACIÓN .....</b>   | <b>11</b> |
| CAPITULO I.   | <b>INTRODUCCIÓN .....</b>   | <b>13</b> |
| CAPITULO II.  | <b>MATERIAL Y MÉTODOS .....</b>   | <b>17</b> |
| II.1.         | Descripción de la zona .....  | 19        |
| II.2.         | Información recopilada .....  | 21        |
| II.3.         | Modelo de simulación .....  | 23        |
|               | Balance de agua en el suelo .....   | 24        |
|               | Requerimientos de agua del cultivo .....  | 26        |
|               | Planificación del riego .....   | 27        |
|               | Consideraciones espaciales .....  | 28        |
| II.4.         | Índices de calidad del riego .....  | 28        |
|               | Índices de calidad del riego relacionados con el uso del agua .....                     | 28        |
|               | Índices económicos de calidad del riego .....   | 29        |
| CAPITULO III. | <b>RESULTADOS .....</b>   | <b>31</b> |
| III.1.        | Distribución de cultivos .....  | 33        |
| III.2.        | Consumos hídricos .....   | 36        |
| III.3.        | Necesidades de riego .....  | 39        |
| III.4.        | Índices de calidad del riego .....  | 40        |
|               | Aporte relativo anual de riego (ARAR) .....   | 43        |
|               | Aporte relativo anual de agua (ARAA) e índice de producción (IP) .....                  | 48        |
|               | Índice de drenaje (ID) .....  | 53        |
|               | Índices económicos de calidad del riego .....   | 53        |
|               | Combinación de índices de calidad del riego para la evaluación de la zona regable ..... | 56        |
| CAPITULO IV.  | <b>CONCLUSIONES .....</b>   | <b>61</b> |
|               | <b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>   | <b>65</b> |

## Presentación

Braulio Medel Cámara. Presidente de Unicaja.

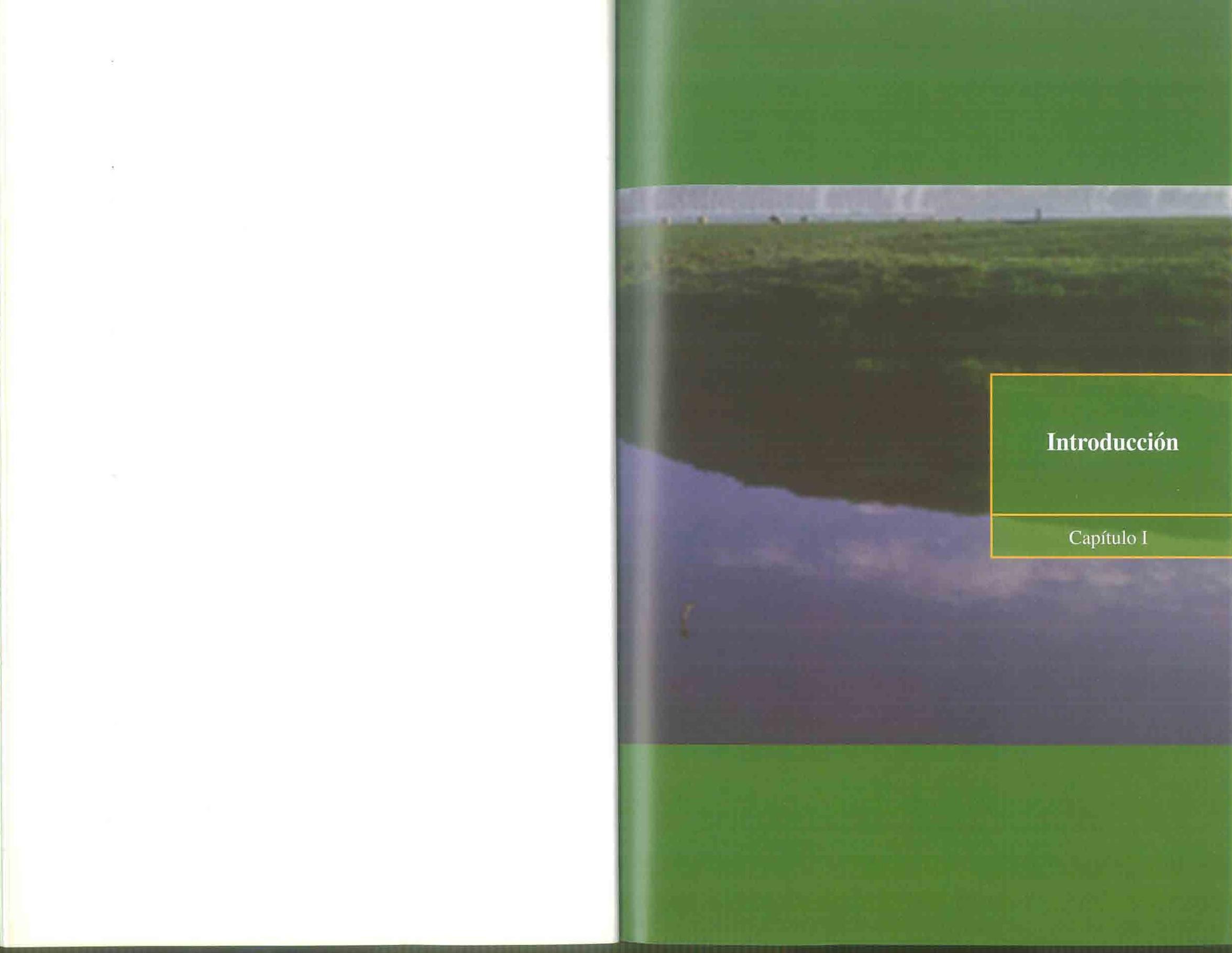
**E**n el convencimiento de la trascendencia de la investigación como instrumento básico en el proceso del desarrollo económico y social de una región y, en particular, de un sector como el agrario, decisivo en la economía andaluza, UNICAJA ha patrocinado, un año más y como viene siendo habitual desde 1999, la quinta edición del **Premio UNICAJA de Investigación sobre Desarrollo Económico y Estudios Agrarios**, cuyo objetivo fundamental es promover e incentivar la realización, y su posterior difusión, de investigaciones sobre la realidad económica que nos rodea.

La continuidad de este Premio de Investigación, dentro del conjunto de premios que patrocina nuestra entidad a través de la Fundación UNICAJA, muestra de forma inequívoca nuestra voluntad de apoyo al sector agrario andaluz, así como el deseo de profundizar en su conocimiento y estudio como unas de las actividades clave del desarrollo futuro de nuestra región.

En la quinta convocatoria, dada la calidad de los trabajos presentados, el Jurado, por unanimidad, acordó conceder un accésit al trabajo **“Evaluación del riego de la zona regable del Genil-Cabra (Santaella, Córdoba): índices de calidad de riego”**, realizado por D. Ignacio Lorite Torres, miembro del Instituto de Agricultura Sostenible. En esta investigación, el Jurado valoró el alto nivel técnico que aporta el trabajo desarrollado, en el que se emplean novedosas metodologías, que se aplican a una zona concreta, y se aportan recomendaciones para la mejora del manejo del riego en la zona objeto de estudio.

Partiendo de la consideración del agua como un recurso cada vez más escaso, que plantea la necesidad ineludible de su gestión dentro de las zonas regables, el estudio se centra en la zona regable del Genil-Cabra (Santaella, Córdoba). En él se determina que el riego se realiza, en general, de forma deficitaria y que su gestión por los agricultores de la zona presenta una gran variabilidad. El olivar y el ajo aparecen como los cultivos en los que un incremento en la aplicación de riego sería más productivo, mientras que en otros no resulta conveniente su incremento desde un punto de vista de productividad del agua.

Con el propósito de que la investigación realizada alcance la mayor difusión posible dentro de la comunidad científica y entre los agentes económicos y sociales relacionados con el sector agrario, la Fundación UNICAJA, a través de su Servicio de Publicaciones, se complace en editar la presente investigación, que viene a añadirse al amplio elenco de estudios ya publicados, los cuales permiten un mejor conocimiento de un sector tradicional y básico de la economía andaluza.

The image shows the right-hand page of an open book. The page features a landscape photograph of a green field under a cloudy sky. The top and bottom of the page are framed by solid green borders. On the right side, there is a white rectangular box with a thin black border. Inside this box, the word "Introducción" is written in a bold, black, serif font. Below it, in a smaller, regular black serif font, is the text "Capítulo I".

**Introducción**

Capítulo I

## I. INTRODUCCIÓN

Todos los análisis globales de la situación de los recursos hídricos indican que es probable que la disponibilidad de agua para riego se reduzca de forma significativa en el futuro, debido al incremento de las demandas provenientes de otros sectores tales como los turísticos, recreativos, medioambientales y urbanos.

De acuerdo con estimaciones realizadas en los planes hidrológicos de cuenca, la demanda actual de agua en España es de 35,000 hm<sup>3</sup>/año. De esta cantidad, el 68% corresponde a riegos y el resto a otros usos (Ministerio de Medio Ambiente, 1998). La mejora en el manejo del agua y la modernización y rehabilitación de las zonas regables españolas son acciones que deberían contribuir a la mejora en la eficiencia en el uso del agua en España. Solamente el 27% de la superficie regada en España (es decir, aproximadamente 915,000 ha) tienen una antigüedad inferior a 20 años, mientras que un 37% tiene más de 90 años de antigüedad (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1998). En estas publicaciones se ha puesto especial énfasis en la necesidad de modernización y rehabilitación de nuestros regadíos, pero muy poco se ha dicho acerca de cómo mejorar el manejo del agua en la agricultura de riego.

Para mejorar la gestión del agua es necesario en primer lugar, 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. Para simular los diferentes componentes del ciclo hidrológico en la agricultura de riego, han sido muchos los modelos empleados, desde los funcionales (Doorenbos y Pruitt, 1977; Doorenbos y Kassam, 1979; Allen et al., 1998), hasta los mecanísticos (Abbott et al., 1986; van Aelst et al., 1988; Williams et al., 1989; Querner et al., 1997).

Recientemente se han aplicado instrumentos o técnicas tales como la teledetección (Roberts et al., 1992; Shih y Jordan, 1993) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Hartkamp et al., 1999) para facilitar la adquisición de información y para llevar a cabo análisis espaciales. Estas herramientas han sido combinadas con los modelos de simulación para analizar el comportamiento de zonas regables (Mallawaarachchi et al., 1996; Engel et al., 1997; Beinroth et al., 1998).

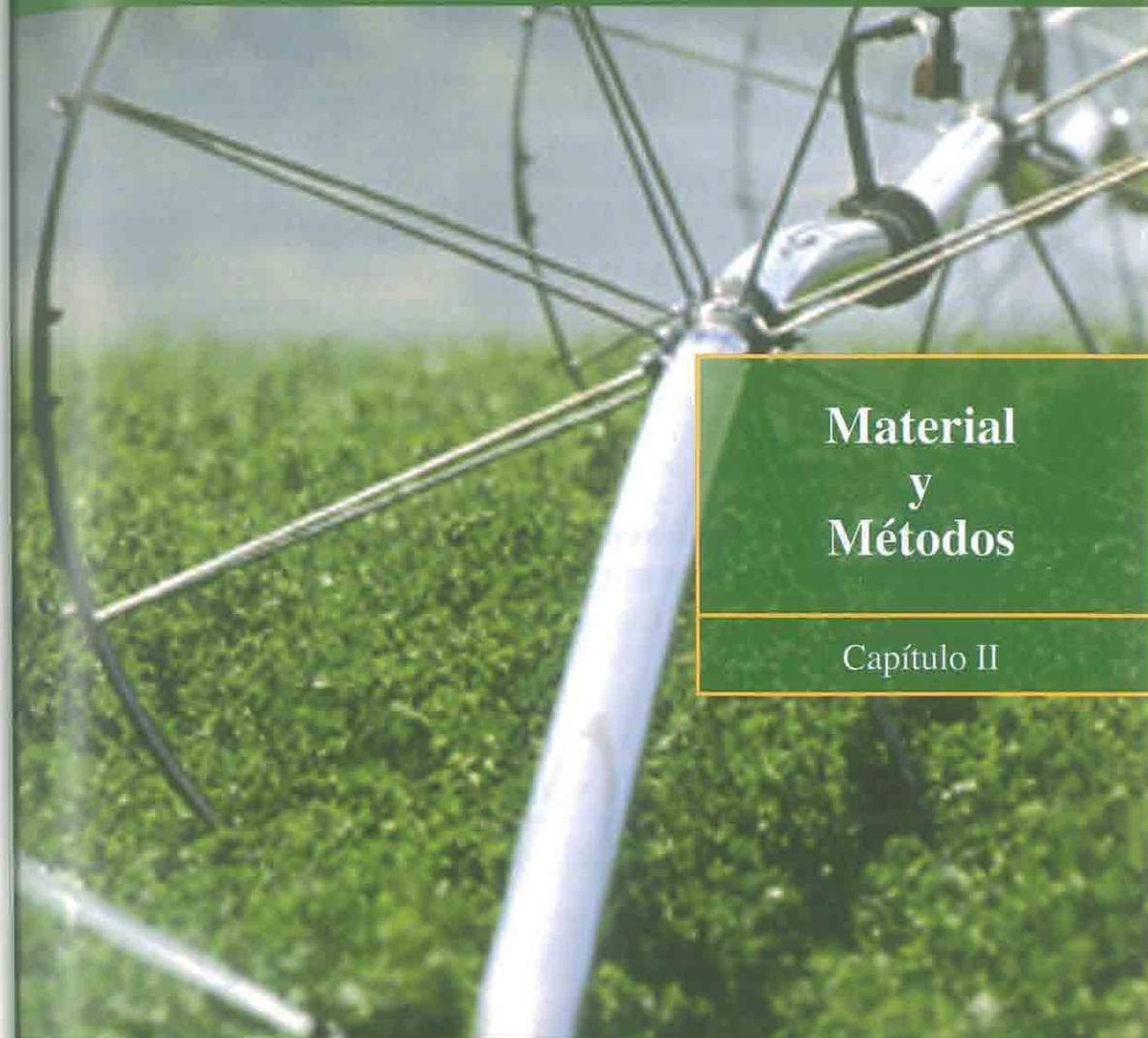
El análisis de la calidad del riego se basa en una serie de índices definidos para caracterizar el funcionamiento del sistema de riego (Molden y Gates,

1990; Kalu et al., 1995; Malano y Burton, 2000) con el objetivo de evaluar prácticas de riego en una zona y para mejorar la eficiencia en la aplicación del riego y la productividad del agua. Dentro de los índices de calidad del riego se han definido diferentes tipos (Bos 1997; Bos 2000) relacionados con el balance de agua, con aspectos económicos, ambientales, sociales o de mantenimiento del sistema. Estos indicadores 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 determinar la optimización de los recursos (Molden y Gates, 1990) y para encontrar una solución de compromiso entre la equidad y la eficiencia en el reparto del agua dentro de una zona regable (Kalu et al., 1995).

Tradicionalmente los índices de calidad del riego han sido utilizados empleando un valor medio el cual representa la totalidad de una zona regable. Sin embargo, este procedimiento podría no reflejar la situación real de la zona debido a que no se tiene en cuenta la variabilidad del comportamiento entre los diferentes agricultores a la hora de evaluar el manejo del riego. Para caracterizar la variabilidad entre parcelas y sus efectos, sería necesario obtener información para cada finca y parcela individual, lo cual implica un considerable esfuerzo a la hora de su adquisición.

Los objetivos de este trabajo se han centrado en proporcionar una completa y cuantitativa evaluación del funcionamiento del riego en una zona regable. En concreto, la zona regable seleccionada para el estudio ha sido la zona regable de Genil – Cabra, colectividad de Santaella, situada en la provincia de Córdoba. Ha sido elegida debido a la posibilidad de obtención de información sobre consumos individuales y sobre la distribución de cultivos. Otra razón para su selección ha sido la ausencia de limitaciones en la distribución del agua, debido al suministro de agua es a la demanda, por lo que el único problema sería un inadecuado manejo del riego por parte de los agricultores.

La evaluación del funcionamiento se ha realizado mediante el cálculo de valores medios de índices de calidad del riego y del análisis de su variabilidad dentro de la zona regable, basándose en información recogida durante cuatro campañas de riego, desde 1996/97 a 1999/2000. Finalmente se han propuesto recomendaciones para la mejora del manejo del riego en la zona regable estudiada.



## Material y Métodos

### Capítulo II

## II. MATERIAL y MÉTODOS

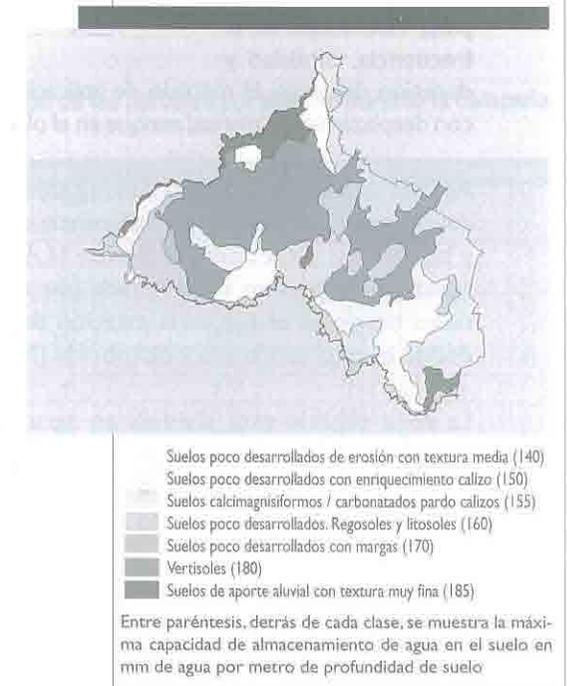
### II.1 Descripción de la zona

La zona estudiada está localizada dentro de la zona regable del Genil – Cabra (ZRGC), en el término municipal de Santaella, provincia de Córdoba, ( $4^{\circ} 51' W, 37^{\circ} 31' N$ ). 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). La puesta en funcionamiento de la comunidad de regantes fue 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. En concreto, el estudio se ha centrado en los sectores VIII, IX, X y XI. La superficie señalada como de riego en estos sectores ha ido variando hasta la última campaña estudiada (1999/2000), en la cual 6.989,4 ha están inscritas en la comunidad de regantes.

El clima de la zona es Mediterráneo continental con una precipitación media anual de 606 mm (en el periodo 1961-1990) y un periodo seco y caluroso durante el verano. La temperatura media diaria oscila entre los  $10^{\circ}C$  en invierno y los  $27^{\circ}C$  en verano. Como se recoge en el Mapa 1, los suelos predominantes en la área son vertisoles (35%) y suelos poco desarrollados (34,7%).

La determinación de la pendiente de la zona regable se ha hecho

MAPA 1 Mapa de suelos de la zona regable



por medio de la realización del modelo digital de elevaciones de la zona, a partir de mapas de curvas de nivel a escala 1:10000. La pendiente media de la zona regable es del 6.4% y la pendiente media de cada parcela se muestra en el Mapa 2.

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

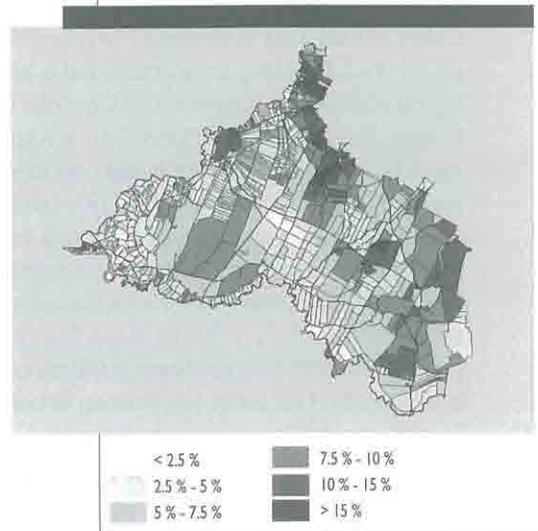
La zona cuenta con un moderno sistema de distribución en tubería enterrada el cual permite realizar un suministro a la demanda. El sistema proporciona al agricultor una completa flexibilidad en la frecuencia, cantidad y duración del riego. El método de aplicación más común es el de aspersión con desplazamiento manual aunque en el olivar el riego por goteo es frecuente.

Aproximadamente 2,600 ha son regadas por medio de una red ramificada cuya presión la consigue por diferencia de cotas entre el punto de origen y las parcelas. La restante superficie (4,400 ha) es abastecida por una red ramificada a presión suministrada por una estación de bombeo. Ambas redes tienen su origen en la estación de puesta en carga de San José, en donde el agua es filtrada y distribuida (Mapa 3).

La zona regable está dividida en agrupaciones. Cada agrupación está compuesta por una o varias parcelas dependiendo de la superficie. La red de presión suministra agua a 44 agrupaciones mientras que la red de gravedad suministra agua a las 39 agrupaciones restantes.

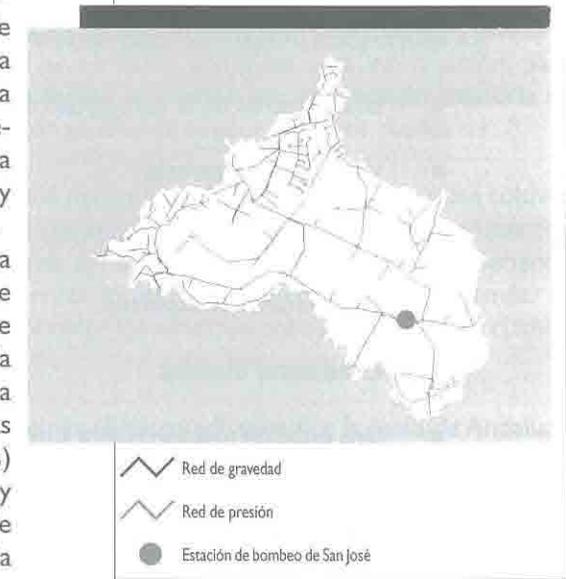
La zona posee cuatro tipos de puntos de control del agua en el sistema. El primero se encuentra en las tomas de parcela. Usa un contador de paso total, un limitador de caudal y un limitador de presión. El segundo tipo de punto de control se encuentra al comienzo de cada agrupación y está dotado

MAPA 2 Mapa de pendientes medias de cada parcela



de un caudalímetro, de un limitador de caudal y de un regulador de presión. Los dos últimos tipos de puntos de control se encuentran 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. En cuanto a la estructura de la propiedad se observa una fuerte atomización de la misma (Cuadro 1). Una inmensa mayoría de las explotaciones (92%) tienen menos de 20 ha y representan el 52.7% de la superficie total de la zona regable.

MAPA 3 Mapa con la red de distribución



CUADRO 1

Distribución de las parcelas por tamaño durante la campaña 1999/2000

| Superficie | Nº Parcelas | % Parcelas | Superficie | % Superficie |
|------------|-------------|------------|------------|--------------|
| < 1 ha     | 142         | 16.86      | 87.21      | 1.25         |
| 1-2        | 148         | 17.58      | 210.58     | 3.01         |
| 2-3        | 101         | 12.00      | 250.52     | 3.58         |
| 3-4        | 89          | 10.57      | 301.34     | 4.31         |
| 4-5        | 52          | 6.18       | 231.15     | 3.31         |
| 5-10       | 120         | 14.25      | 794.86     | 11.37        |
| 10-15      | 76          | 9.03       | 1,012.47   | 14.49        |
| 15-20      | 47          | 5.58       | 794.75     | 11.37        |
| 20-50      | 46          | 5.46       | 1,486.75   | 21.27        |
| 50-100     | 18          | 2.14       | 1,224.34   | 17.52        |
| > 100 ha   | 3           | 0.36       | 595.41     | 8.52         |

## II.2 Información recopilada

El estudio se ha llevado a cabo durante cuatro campañas de riego (1996/97 hasta 1999/2000). En estas cuatro campañas de riego no ha habido

restricciones en el suministro de agua para riego aunque en la campaña 1998/99 la precipitación registrada fue muy escasa (150 mm) en comparación con la precipitación media (559 mm) en los cuatro años estudiados.

La información utilizada en este estudio tiene varias fuentes:

- Los registros de la comunidad de regantes
- Visitas a cada parcela
- Encuesta a los regantes
- Entrevistas con expertos
- Estadísticas oficiales
- Una estación meteorológica automática perteneciente al Instituto de Agricultura Sostenible (IAS) y ubicada en la zona que genera mediciones diarias de radiación solar, temperatura máxima y mínima, humedad relativa, déficit de presión de vapor, velocidad del viento y lluvia.

La distribución de cultivos se registró en cada campaña de riegos. También se registró el consumo acumulado de agua en cada parcela en 4 ó 5 fechas a lo largo de cada campaña de riego.

Los mapas de suelos y el parcelario fueron también proporcionados por la comunidad de regantes. Otra información necesaria fueron los valores de uniformidad para cada tipo de emisor (aspersor o gotero) y fue suministrada por el Servicio de Asesoramiento al Regante promovido por la Junta de Andalucía. La información diaria meteorológica se obtuvo de la estación meteorológica del Instituto de Agricultura Sostenible ya citada. El método de riego fue determinado mediante visitas de campo a cada parcela de la zona regable.

Otra fase en la obtención de información, fue la referida a las prácticas de manejo del riego llevadas a cabo por el agricultor. Por medio de entrevistas personales con el gerente de la zona y la realización de una encuesta a la totalidad de los agricultores (la cual fue contestada correctamente por aproximadamente el 10% de los agricultores) se obtuvieron valores de frecuencia y duración del riego. Prácticas como el corte del riego al final

del ciclo del cultivo o la aplicación de riegos de preemergencia fueron consideradas usando la información proporcionada por entrevistas con los agricultores y expertos de la zona (F. Orgaz, comunicación personal).

Por las mismas vías, se obtuvo información relativa a la fecha de siembra empleada en cada parcela. Su obtención es de gran importancia (Leenhardt y Lemaire, 2002), pero al no estar completa esta información, para determinar las restantes fechas se empleó una distribución aleatoria de acuerdo a una distribución normal alrededor del valor medio.

La información relativa a la máxima producción de los diferentes cultivos en las condiciones locales ha sido obtenida por medio de entrevistas con el gerente de la zona regable, agricultores y técnicos con amplia experiencia en la zona (F. Orgaz, comunicación personal). Un procedimiento similar ha sido llevado a cabo para obtener los rendimientos esperados de los cultivos en ausencia de riego.

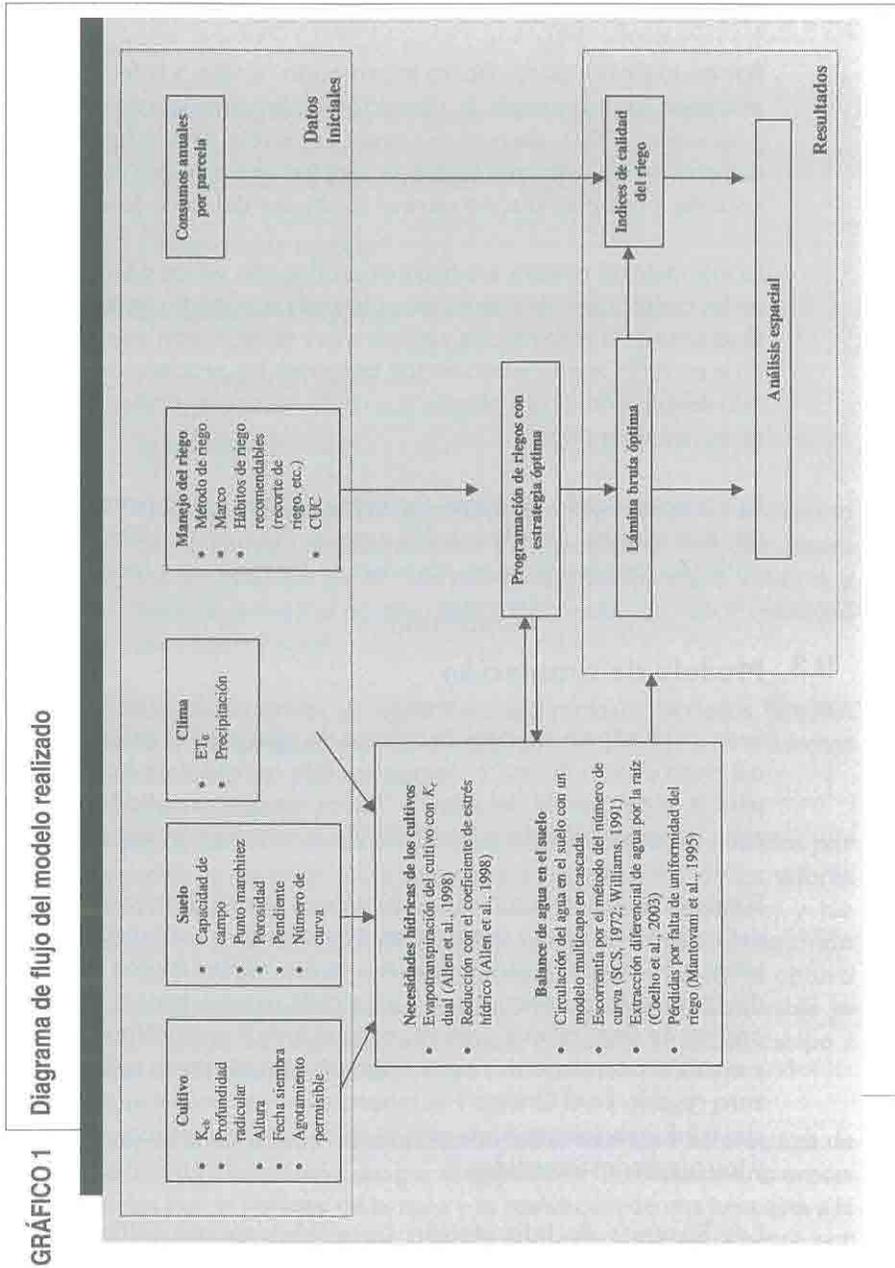
Finalmente, usando boletines técnicos editados por la Junta de Andalucía (Boletín semanal de información agraria, 1997, 1998, 1999, 2000) se han obtenido los precios de las cosechas en los mercados locales.

### II.3 Modelo de simulación

Se ha realizado un modelo de balance de agua para el análisis del manejo del riego dentro de una zona regable. Esta herramienta ha sido realizada para la zona regable del Genil – Cabra aunque es aplicable a cualquier zona regable en donde esté disponible la información necesaria.

El modelo está compuesto por submodelos que analizan cada componente del balance de agua y evalúan los efectos sobre los cultivos del déficit hídrico. El modelo proporciona resultados diarios de los componentes del balance de agua en el suelo para cada parcela, genera un calendario óptimo de riego tal que evite la ocurrencia de estrés y filtración profunda y evalúa el calendario de riegos realmente empleado en cada parcela de la zona regable. En el Gráfico 1 se muestra un diagrama de flujos del modelo, con la información necesaria para su utilización, los componentes del mismo y los resultados obtenidos.

Los Sistemas de Información Geográfica fueron utilizados para la superposición de las parcelas con los tipos de suelo y así caracterizar las unidades de estudio en donde el modelo de simulación ha sido aplicado.



### Balance de agua en el suelo

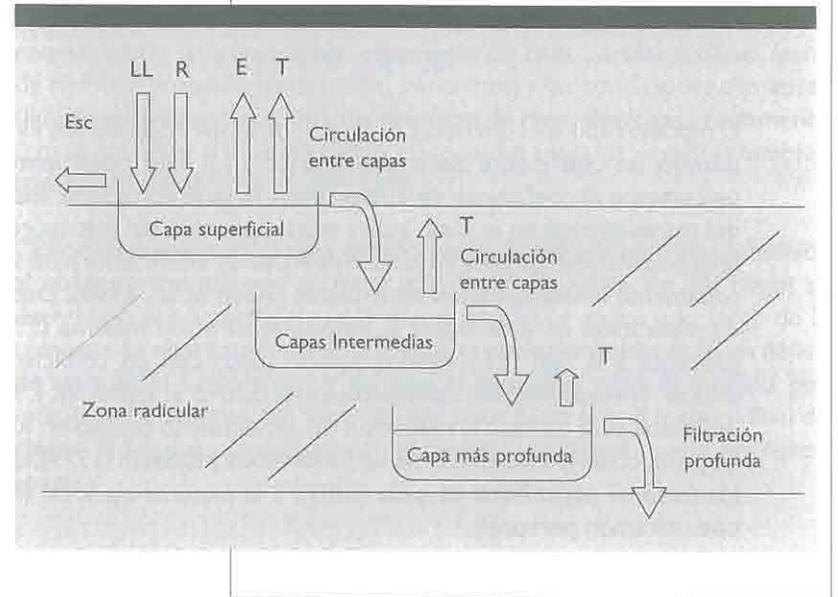
Se ha desarrollado un modelo de simulación con múltiples capas de suelo en escala diaria (Gráfico 2). Las entradas al sistema son la lluvia y el riego, mientras que el ascenso capilar y el flujo lateral no fueron considerados. Las salidas del sistema son la transpiración del cultivo, evaporación desde el suelo, escurrimiento superficial, filtración profunda a partir de que el perfil del suelo está lleno y pérdidas por filtración profunda debidas a la falta de uniformidad del sistema de riego.

La escurrimiento se calcula para cada lluvia diaria utilizando el método del número de curva SCS (Soil Conservation Service, 1972). Se ha incluido un ajuste para expresar los efectos de la pendiente y la humedad del suelo sobre la escurrimiento (Williams, 1991). Se asume que el riego no produce escurrimiento. Como el agua absorbida por los cultivos no es uniforme en el perfil del suelo si no que depende de la densidad radicular y del contenido de agua en cada capa del suelo (Taylor, 1983), la absorción de agua por las raíces del cultivo fue calculada siguiendo a Coelho et al. (2003).

La evaporación desde el suelo se asigna al horizonte superior del suelo. Este componente está incluido en el término de evapotranspiración y se describe en el siguiente apartado.

**GRÁFICO 2**

Representación esquemática de la circulación en cascada del agua entre capas dentro de la zona radicular



La filtración profunda se calcula trasladando sucesivamente a cada capa inferior el exceso sobre capacidad de campo de cada capa superior. Cuando la última capa (donde se encuentra la máxima profundidad de raíces) se llena, el exceso producido será considerado como filtración profunda, al quedar fuera del alcance de las raíces.

Cualquier falta de uniformidad en los emisores provocará que sea necesario incrementar la cantidad aportada al cultivo para satisfacer los requerimientos en toda la superficie de la parcela (Wu, 1988; Anyoji y Wu, 1994). En este trabajo se ha considerado que la cantidad total de agua descargada por los emisores sigue una distribución uniforme (Mantovani et al., 1995). Con estas suposiciones se ha obtenido un valor para las pérdidas por este tipo de filtración profunda.

### Requerimientos de agua del cultivo

Los requerimientos de agua del cultivo han sido calculados siguiendo el procedimiento descrito en el manual N° 56 de la FAO (Allen et al., 1998; Allen, 2000). Para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ), se parte de la evapotranspiración de referencia diaria ( $ET_0$ ), que ha sido calculada usando la ecuación de Penman-Monteith empleando la información meteorológica proporcionada por la estación meteorológica del IAS situada en la zona. Para considerar la transpiración del cultivo se emplea el coeficiente de cultivo basal ( $K_{cb}$ ). Además, el modelo estima el coeficiente de evaporación desde el suelo ( $K_e$ ) por medio del cálculo de la energía disponible en la superficie del suelo (Allen et al., 1998):

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

El modelo reduce el término  $ET_{c\max}$  (evapotranspiración sin estrés hídrico) usando un coeficiente de estrés hídrico ( $K_s$ ). Este coeficiente afecta únicamente al coeficiente de cultivo basal ( $K_{cb}$ ), al considerar los efectos del estrés hídrico en el suelo sobre la transpiración del cultivo, cuando el contenido medio de agua en la zona radicular es insuficiente para soportar totalmente la transpiración de la planta (Allen et al., 1998). Debido a la consideración de este factor, la evapotranspiración máxima ( $ET_{c\max}$ ) es diferente a la real ( $ET_c$ ). Ambos valores junto con un coeficiente para evaluar la respuesta del rendimiento del cultivo al estrés ( $K_y$ ), han sido utilizados para estimar la reducción del rendimiento basado en funciones de producción lineales descritas en Doorenbos y Kassam (1979), ajustando los factores específicos de cada cultivo a la experiencia local (F. Orgaz, comunicación personal).

### Planificación del riego

La absorción de agua por un cultivo se reduce antes de que se alcance el punto de marchitez permanente. Por este motivo es necesario anticipar la aplicación del riego si se quieren evitar los efectos del estrés sobre el cultivo. El valor umbral de humedad del suelo por debajo del cual el cultivo comienza a sufrir estrés, depende del cultivo y ha sido obtenido para diferentes cultivos en Allen et al. (1998), modificados según las condiciones locales (F. Orgaz, comunicación personal).

Se han analizado dos estrategias de riego: una óptima y otra real. En la estrategia óptima, el riego es aplicado en el momento adecuado para evitar que el cultivo sufra estrés y con la cantidad necesaria para que no se produzcan pérdidas de agua por filtración profunda. Adicionalmente, se han considerado prácticas de riego comunes en la zona como el recorte 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).

Con la estrategia real, el calendario de riegos se realiza a partir del consumo medido en cada parcela. Esta información se basa en medidas periódicas del consumo realizado por el agricultor. Estas medidas se han realizado cuatro o cinco veces a lo largo de la campaña de riego, dependiendo de la campaña. Este consumo se distribuye a lo largo de la campaña de riego determinando el momento más adecuado para su aplicación (se ha supuesto que el agricultor lo ha hecho así), independientemente de si el agricultor ha realizado un riego excesivo o deficitario. Para generar este calendario real, se ha usado el modelo de simulación descrito previamente, considerando las condiciones específicas de cada parcela (cultivo, fecha de siembra, propiedades del suelo, pendiente) y las condiciones climáticas (lluvia y evapotranspiración). Las prácticas de riego descritas previamente (corte del riego al final del ciclo y riego inicial antes de siembra) también han sido consideradas en este caso.

Conocido el volumen de agua gastado y la dosis aplicada por riego (obtenida al conocerse el método de riego y las horas de aplicación del riego) se determinó el número de riegos que el agricultor aplicó a lo largo de la campaña. La distribución de esos riegos se realizó considerando un déficit de agua en el suelo a partir del cual el agricultor regó. El modelo, por medio de iteraciones, fue variando ese valor hasta que el número final de riegos simulados coincidiera con el número de riegos que el agricultor aplicó.

### Consideraciones espaciales

Como es habitual encontrar diferentes tipos de suelos dentro de la misma parcela, a la hora de la simulación surgen unidades con características heterogéneas dentro de la parcela real. Tanto para el almacenamiento como para la realización de este análisis espacial se han empleado los SIG, ARC/INFO y ARC/VIEW.

Una vez definidas estas unidades, el modelo de simulación se aplica a cada una de ellas. Los resultados obtenidos son agregados considerando cada una de las unidades que componen cada parcela, ponderado por la superficie de cada unidad. 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 vuelve a utilizar ARC/VIEW para la realización del análisis espacial.

## II.4 Índices de calidad del riego

Se han empleado los siguientes seis índices de calidad del riego: el aporte relativo anual de riego, el aporte relativo anual de agua, el índice de drenaje, el índice de producción, la productividad del agua y la productividad marginal del agua. Otros indicadores que evalúan la equidad o la fiabilidad del sistema (Molden y Gates, 1990) no son necesarios en esta zona debido a que el sistema de distribución del agua es a la demanda y no se han presentado problemas de suministro.

### Índices de calidad del riego relacionados con el uso del agua

Malano y Burton (2000) definieron un conjunto de indicadores para la evaluación comparativa del riego y el drenaje en distintas zonas regables. Incluidos en esta serie de índices, se encuentran el aporte relativo anual de riego (ARAR) y el aporte relativo anual de agua (ARAA). Ambos indicadores se definen como:

$$ARAR = \frac{\text{Volumen anual de riego aportado}}{\text{Volumen anual de riego demandado por el cultivo}} \quad [2]$$

y:

$$ARAA = \frac{\text{Volumen anual de agua aportada}}{\text{Volumen anual de agua demandada por el cultivo}} \quad [3]$$

El ARAR relaciona el volumen de agua distribuido para riego a los usuarios durante la campaña de riego con el volumen de agua de riego necesario

para evitar un estrés indeseable a lo largo del ciclo de crecimiento del cultivo. El ARAA relaciona el volumen total de agua aportado para riego más la lluvia con el volumen de agua demandado por el cultivo.

Bos (2000), definió un indicador llamado *índice de drenaje del sistema*, el cual determina el cociente entre la cantidad total de agua percolada y la cantidad total de agua incorporada al sistema. Un índice similar se ha definido aquí referido exclusivamente a la percolación profunda del agua aplicada como riego.

$$ID = \frac{\text{Volumen de agua percolada debida al riego}}{\text{Volumen de riego incorporado al sistema}} \quad [4]$$

Con este índice se analizan las pérdidas de agua por filtración profunda producidas al aplicar el riego, las cuales dependen de la lámina de riego aplicada y la fecha de aplicación.

Otro índice de calidad del riego analizado ha sido el índice de producción, *IP* definido por Bos (2000) como,

$$IP = \frac{\text{Cosecha obtenida en las condiciones reales}}{\text{Cosecha máxima pretendida}} \quad [5]$$

El índice de producción relaciona la producción real con la máxima alcanzable por el cultivo. Este rendimiento máximo alcanzable varía con el cultivo, la fertilidad del suelo, la gestión del agricultor, etc. Es preciso indicar que este índice es el resultado de utilizar el modelo de simulación. Esto implica que factores ajenos al riego como la fertilización, plagas o enfermedades no han sido considerados y así, la gestión del agua ha sido considerada de forma independiente.

### Índices económicos de calidad del riego

Se han definido dos indicadores para evaluar la productividad del agua aplicada a los cultivos. El primer indicador se ha definido como la producción por unidad de riego aplicado (Malano y Burton, 2000) o productividad del agua (*PA*). Es definido como:

$$PA = \frac{\text{Valor anual de la producción agrícola}}{\text{Volumen anual de agua de riego empleada}} \quad (\text{€/m}^3) \quad [6]$$

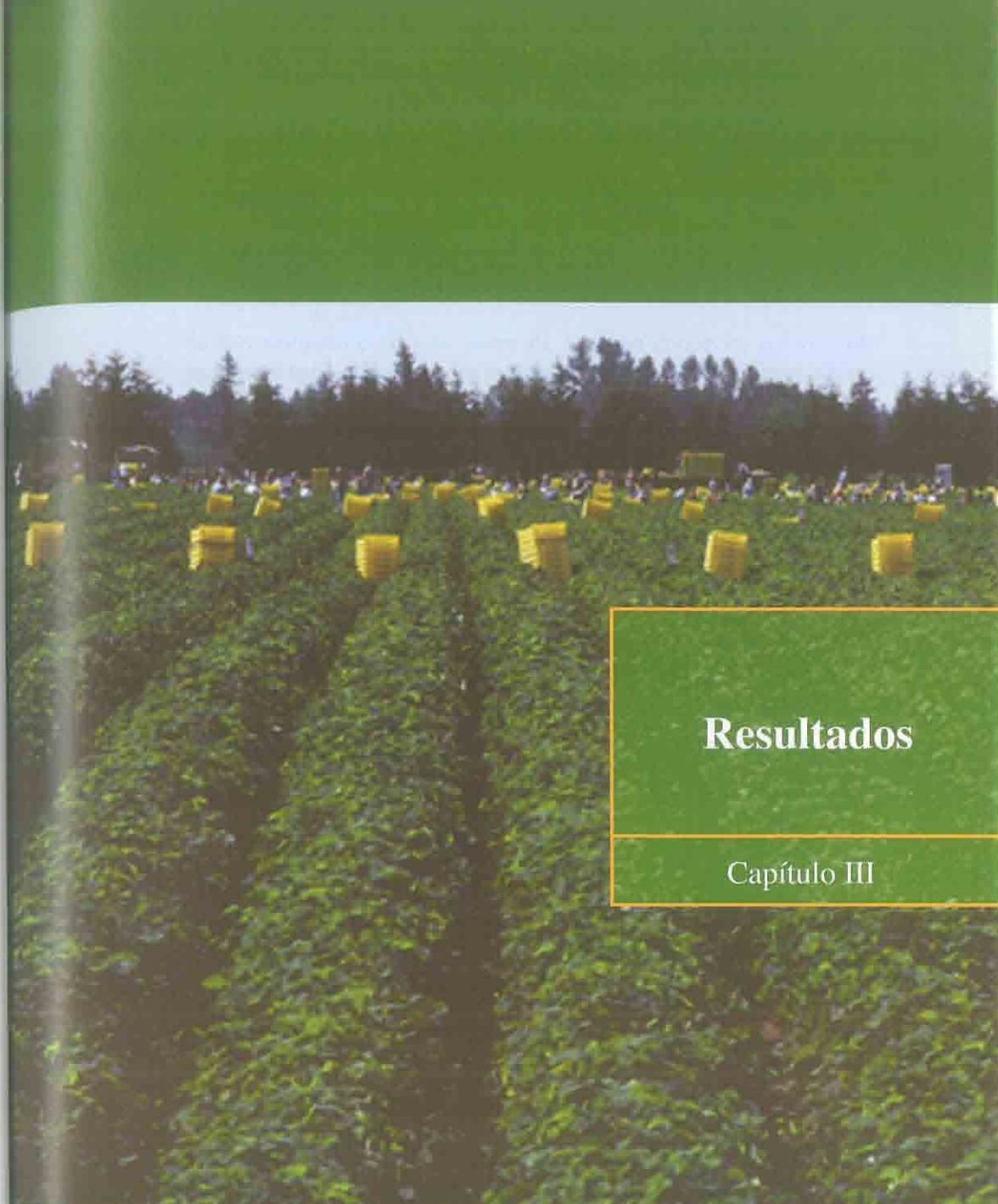
En el numerador se encuentra el valor total de la producción agrícola recibida por los productores y en el denominador se incluye el agua empleada por el agricultor para el riego.

Para calcular el descenso en la producción agrícola debido a un ineficiente manejo del riego, se ha empleado el índice *IP* (anteriormente definido) para obtener la reducción en la cosecha específica para cada parcela causada por el estrés hídrico. Además, se ha requerido conocer la producción máxima del cultivo sin limitaciones de agua y el precio de la cosecha en los mercados locales.

El último indicador considerado ha sido un índice que evalúa la productividad marginal del agua (*PMA*). Bos (1997) definió un índice similar como Cosecha vs. Agua aplicada y analizó la productividad en términos de agua distribuida al cultivo. Aquí se ha definido en términos similares a como lo realizó Howell (2001), que lo denominó *eficiencia del uso del agua de riego*, y viene definido como:

$$PMA = \frac{\text{Incremento en el valor de la producción agrícola debido al riego}}{\text{Volumen anual de riego aplicado}} \quad (\text{€/m}^3) \quad [7]$$

Este indicador requiere conocer el valor de la diferencia entre el rendimiento del cultivo en las condiciones actuales de riego y el rendimiento en condiciones de secano. Tales estimaciones normalmente no consideran cambios en el manejo del cultivo cuando el agricultor pasa de una agricultura de secano a una de regadío. Adicionalmente y al igual que para el índice *PA*, se requieren los precios de la cosecha final en los mercados locales.



## Resultados

### Capítulo III

### III. RESULTADOS

#### III.1 Distribución de cultivos

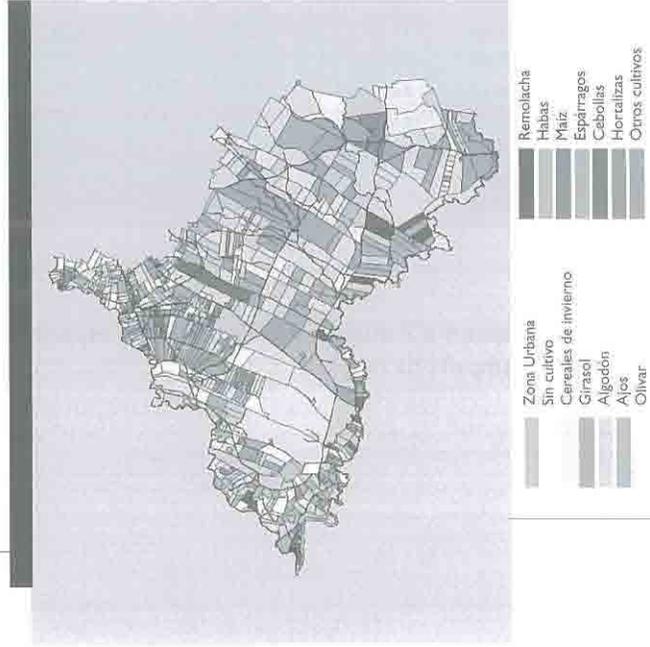
Se han analizado cuatro campañas de riego, en donde los cultivos más frecuentes han sido los cereales de invierno, girasol y algodón. Estos cultivos representan aproximadamente el 27%, 18% y el 16% de la zona regada respectivamente. Otros cultivos también presentes en la zona son ajo, olivar, remolacha, habas, maíz, espárrago y otros cultivos hortícolas. El Cuadro 2 presenta la información sobre el área cultivada cada año estudiado.

**CUADRO 2** Área cultivada de cada uno de los cultivos más frecuentes en la zona a lo largo de los cuatro años estudiados

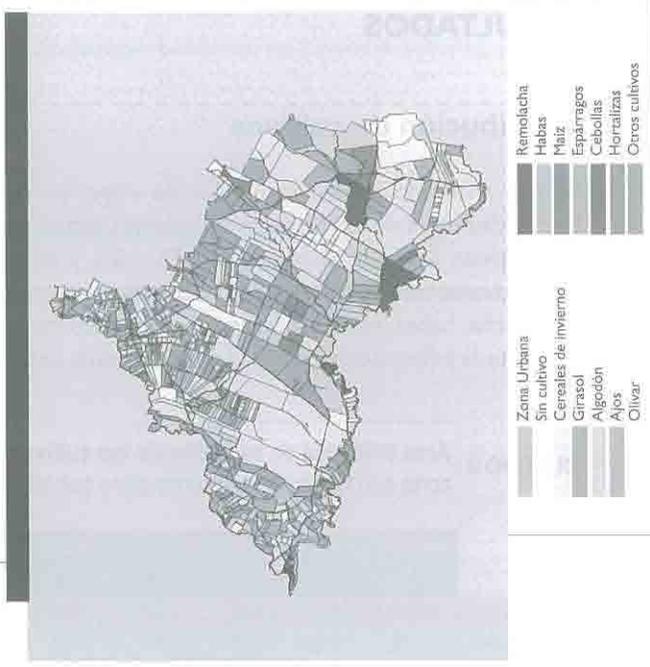
|                                   | 1996/97      |      | 1997/98      |      | 1998/99      |      | 1999/00      |      |
|-----------------------------------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|
|                                   | Area (ha)    | %    |
| Cereales Inv.                     | 1.805        | 29,2 | 1.829        | 28,4 | 1.954        | 28,6 | 1.559        | 22,4 |
| Girasol                           | 1.133        | 18,4 | 1.603        | 24,9 | 874          | 12,8 | 1.342        | 19,3 |
| Algodón                           | 1.120        | 18,1 | 988          | 15,4 | 1.164        | 17,0 | 907          | 13,0 |
| Ajo                               | 839          | 13,6 | 647          | 10,1 | 933          | 13,7 | 1.036        | 14,9 |
| Olivar                            | 535          | 8,7  | 599          | 9,3  | 609          | 8,9  | 656          | 9,4  |
| Remolacha                         | 230          | 3,7  | 231          | 3,6  | 366          | 5,4  | 680          | 9,8  |
| Habas                             | 193          | 3,1  | 53           | 0,8  | 405          | 5,9  | 224          | 3,2  |
| Maíz                              | 96           | 1,6  | 255          | 4,0  | 192          | 2,8  | 146          | 2,1  |
| Espárrago                         | 82           | 1,3  | 105          | 1,6  | 149          | 2,2  | 188          | 2,7  |
| Otros                             | 141          | 2,3  | 122          | 1,9  | 190          | 2,8  | 224          | 3,3  |
| <b>Superficie total cultivada</b> | <b>6.174</b> |      | <b>6.432</b> |      | <b>6.836</b> |      | <b>6.962</b> |      |

Los Mapas 4 a 7 muestran la distribución espacial de estos cultivos para cada campaña de riego.

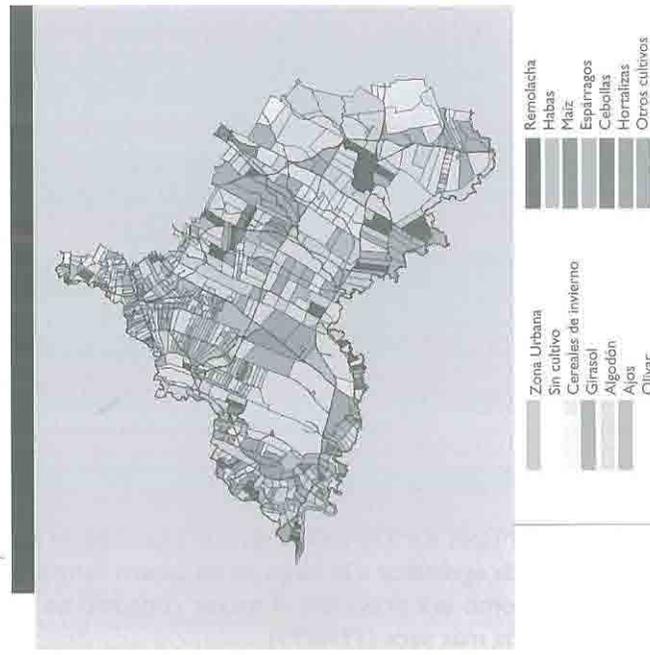
**MAPA 4**  
Distribución de los cultivos más frecuentes en cada una de las parcelas durante la campaña de riego 1996/97



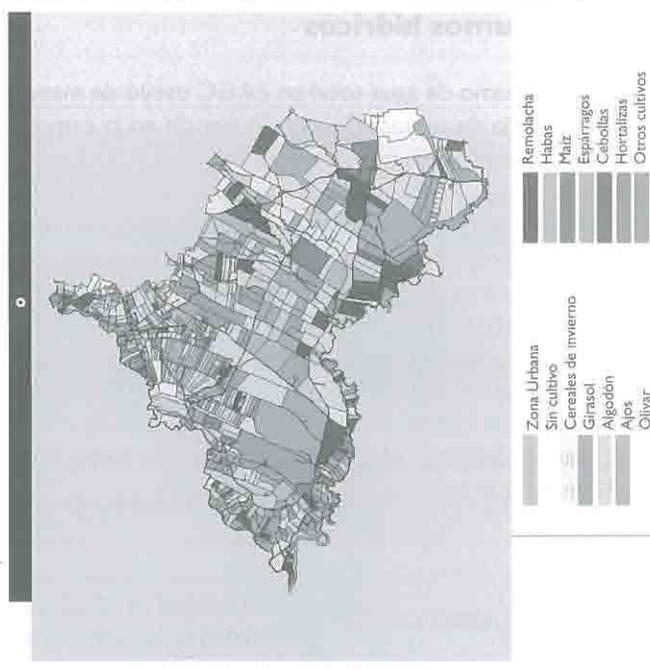
**MAPA 5**  
Distribución de los cultivos más frecuentes en cada una de las parcelas durante la campaña de riego 1997/98



**MAPA 6**  
Distribución de los cultivos más frecuentes en cada una de las parcelas durante la campaña de riego 1998/99



**MAPA 7**  
Distribución de los cultivos más frecuentes en cada una de las parcelas durante la campaña de riego 1999/2000



### III.2 Consumos hídricos

El consumo de agua total en ZRGC osciló de manera importante según la campaña de riegos (Cuadro 3), siendo en la campaña más seca (1998/99) cuando el consumo fue mayor.

Al estudiar este consumo por parcela, es común encontrar parcelas en las que el agricultor ha cultivado dos o más cultivos. El área de cada cultivo es conocida; sin embargo, la distribución del agua entre los cultivos realizada por el agricultor es desconocida. Para poder hacer un análisis por cultivos se han analizado previamente las parcelas en las que únicamente se ha utilizado un cultivo. De estas parcelas se ha extraído el consumo medio para cada cultivo y campaña (Cuadro 3). Esta información se ha utilizado para redistribuir el agua consumida entre todos los cultivos de las parcelas en las que hay más de un cultivo.

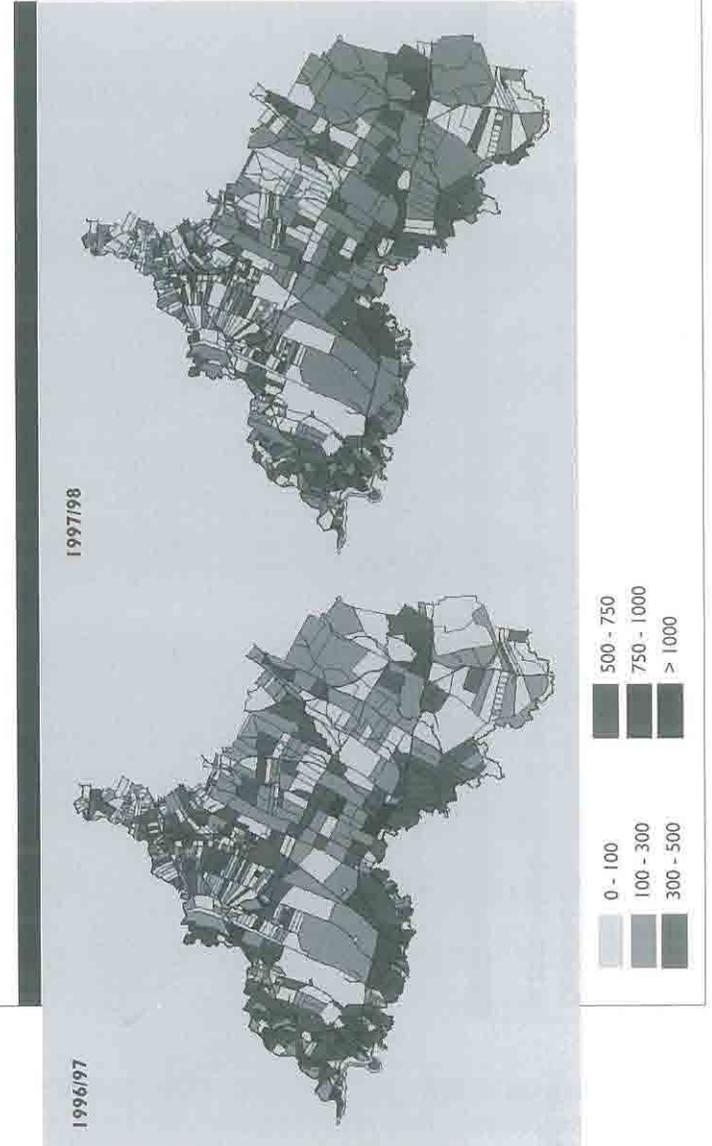
**CUADRO 3** Consumo total de agua en ZRGC (en hm<sup>3</sup>), consumo medio (en mm) realizado por los agricultores

|               | 1996/97       | 1997/98         | 1998/99         | 1999/00       |
|---------------|---------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Consumo total | 16.1          | 14.1            | 29.4            | 17.6          |
| Algodón       | 446<br>(0.33) | 440<br>(0.42)   | 740<br>(0.33)   | 585<br>(0.35) |
| Ajos          | 333<br>(0.42) | 181<br>(0.34)   | 461<br>(0.43)   | 192<br>(0.25) |
| Remolacha     | 297<br>(0.48) | 399<br>(0.30)   | 709<br>(0.19)   | 421<br>(0.58) |
| Maíz          | 448<br>(0.37) | 501.1<br>(0.32) | 712.9<br>(0.37) | 545<br>(0.57) |
| Cereales Inv. | 92<br>(0.68)  | 89<br>(0.87)    | 226<br>(0.67)   | 96<br>(0.78)  |
| Girasol       | 74<br>(1.32)  | 61<br>(1.20)    | 221<br>(0.88)   | 82<br>(1.34)  |
| Olivo         | 132<br>(0.74) | 122<br>(0.88)   | 252<br>(0.74)   | 131<br>(0.77) |

Entre paréntesis, el coeficiente de variación para cada cultivo y campaña.

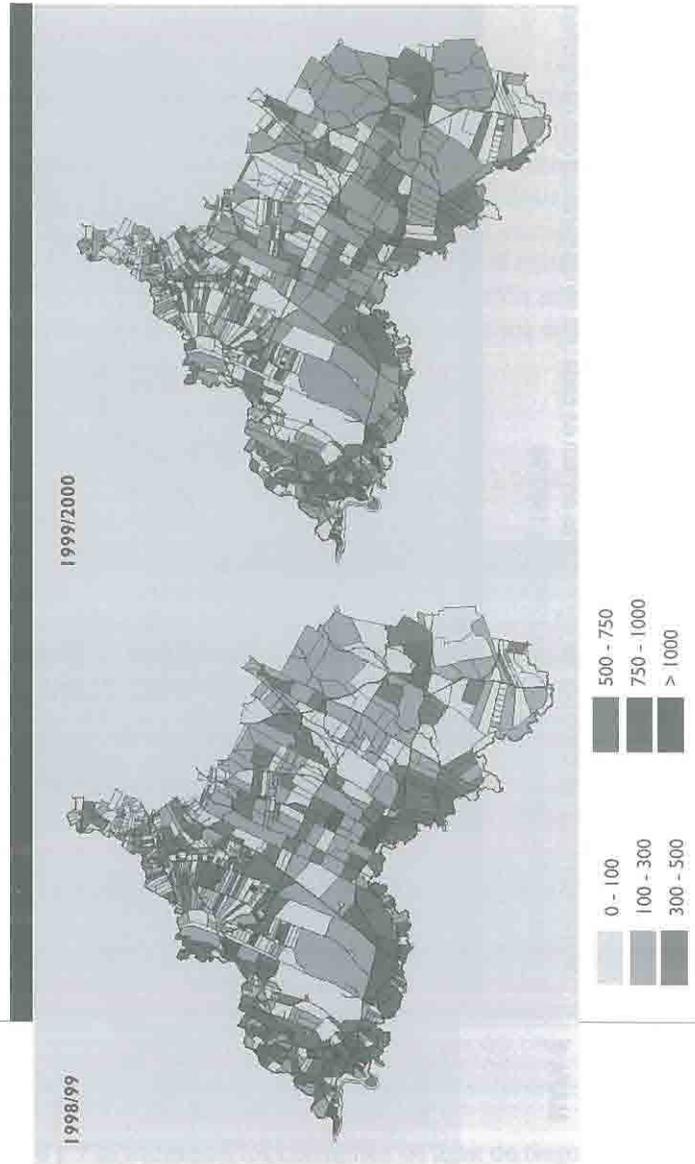
En los Mapas 8 y 9 se muestran los consumos de agua de riego realizados por cada agricultor a lo largo de las cuatro campañas de riego analizadas. Tal y como era previsible el mayor consumo se realizó a lo largo de la campaña más seca (1998/99).

**MAPA 8** Consumo de agua realizado por los agricultores en mm en cada una de las parcelas que componen la zona regable para las campañas 1996/97 y 1997/98



MAPA 9

Consumo de agua realizado por los agricultores en mm en cada una de las parcelas que componen la zona regable para las campañas 1998/99 y 1999/2000

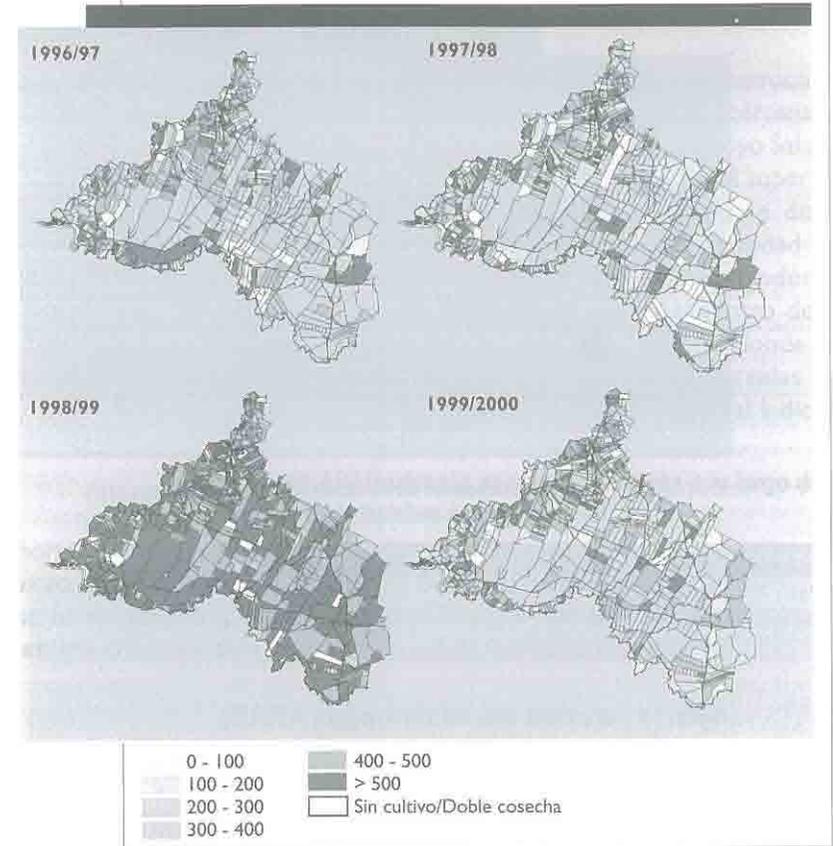


### III.3 Necesidades de riego

Como paso previo a la obtención de los índices de calidad del riego, se simularon los requerimientos óptimos para cada parcela de la zona regable.

MAPA 10

Requerimientos de lámina bruta de riego en mm en las cuatro campañas de riego estudiadas



En el Mapa 10 se recogen las láminas de riego brutas para cada parcela, comprobándose que la lámina requerida viene determinada por el régimen de lluvias de cada campaña de riego. En efecto, la campaña 1998/99 es la que requiere una mayor lámina de riego al ser este año el de menor pluviosidad.

### III.4 Índices de calidad del riego

Con la información anterior y el modelo de programación de riegos, se calcularon los índices de calidad del riego. Los resultados globales para toda la zona regable para los seis índices de calidad del riego en las cuatro campañas de riego estudiadas se muestran en el Cuadro 4.

**CUADRO 4** Valores medios de los seis índices de calidad del riego para la zona del Genil – Cabra

|                         | 1996/97         | 1997/98         | 1998/99         | 1999/00         |
|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ARAR                    | 0.45<br>(0.87)  | 0.49<br>(0.83)  | 0.64<br>(0.61)  | 0.57<br>(0.73)  |
| ARAA                    | 0.80<br>(0.17)  | 0.87<br>(0.13)  | 0.72<br>(0.43)  | 0.82<br>(0.23)  |
| ID                      | 0.017<br>(3.94) | 0.020<br>(3.15) | 0.024<br>(3.17) | 0.018<br>(4.11) |
| IP                      | 0.74<br>(0.28)  | 0.82<br>(0.18)  | 0.72<br>(0.44)  | 0.83<br>(0.29)  |
| PA (€/m <sup>3</sup> )  | 1.36<br>(1.01)  | 1.99<br>(1.20)  | 0.72<br>(1.17)  | 1.62<br>(0.91)  |
| PMA (€/m <sup>3</sup> ) | 0.67<br>(1.15)  | 0.56<br>(1.21)  | 0.72<br>(1.17)  | 0.58<br>(1.41)  |

Coeficiente de variación entre paréntesis.

Los mismos seis índices de calidad del riego descritos anteriormente se calcularon para cada cultivo presente en la zona regable. Los resultados, que se presentan en los Cuadros 5, 7, 8 y 9, proceden de las parcelas en las que sólo se ha cultivado un cultivo en cada campaña analizada.

#### Aporte relativo anual de riego (ARAR)

El valor medio de la zona regable fue menor que 1, oscilando entre 0.45 y 0.64, lo cual indica que globalmente el riego es deficitario (Cuadro 4). El ARAR fue en la campaña seca (1998/99) 0.19 puntos superior al ARAR de las campañas lluviosas (1996/97 y 1997/98). Puesto que la comparación de medias por el método LSD dio diferencias significativas al nivel 0.05 de probabilidad, ello indica que el agricultor sobrestima la contribución de la lluvia a las necesidades de agua de los cultivos, aplicando un menor porcentaje de las necesidades de riego cuanto más lluvioso ha sido el año.

Los valores medios publicados del índice ARAR u otros equivalentes para diferentes zonas regables distribuidas por todo el mundo (Kloezen y

Garcés-Restrepo, 1998; Molden et al., 1998; Burt y Styles, 1999) indican que, en términos generales, los valores de ARAR de las zonas estudiadas son mayores que en ZRGC, si bien, las áreas estudiadas tienen condiciones relativas a cultivos, sistemas de riego, mantenimiento, etc., muy diferentes a las de ZRGC. Las zonas con valores menores de ARAR son las que presentan mejores estructuras de riego o tienen una precipitación anual muy elevada. En zonas geográficamente más cercanas a ZRGC, como la comunidad de regantes de la Loma de Quinto de Ebro en Zaragoza (Dechmi et al., 1999), los valores medios de ARAR fueron sólo ligeramente superiores a los de ZRGC.

La observación de los Mapas 11 y 12 permite detectar cierta estructura espacial en la distribución del índice ARAR. La parte oeste (cercana al núcleo de población de La Montaña) y las partes cercanas al arroyo Salado y al río Cabra, que circundan la zona regable, muestran un ARAR superior a la parte central de la zona regable. Esta diferenciación se debe probablemente a que en la periferia se encuentran gran cantidad de explotaciones familiares de tamaño reducido dedicadas a algodón y hortalizas, y con tradición de riego más antigua que en el centro de la zona donde predominan además parcelas de mayor tamaño donde se cultiva simultáneamente más de un cultivo, y entre ellos, cereales de invierno, girasol u olivar, cultivos que reducen su valor medio del índice.

**CUADRO 5** Valor de ARAR para los principales cultivos a lo largo de las cuatro campañas de riego

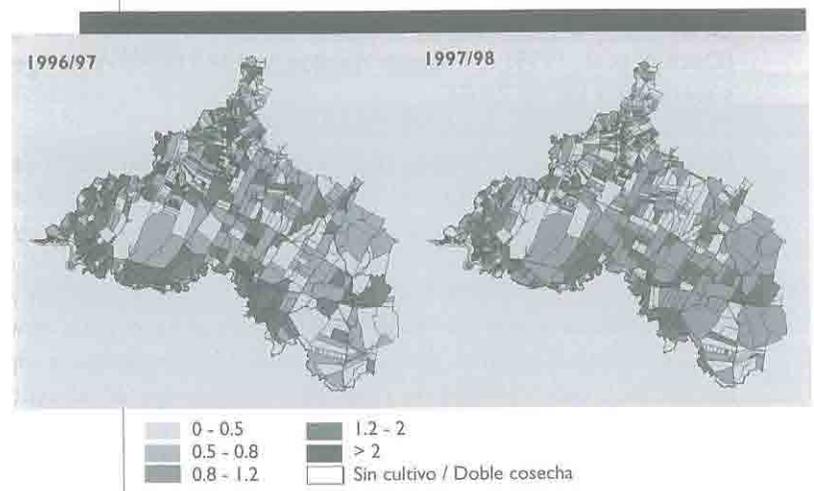
|               | ARAR-96/97     | ARAR-97/98     | ARAR-98/99     | ARAR-99/00     |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Algodón       | 0.75<br>(0.33) | 0.70<br>(0.42) | 0.87<br>(0.33) | 0.83<br>(0.36) |
| Ajos          | 0.70<br>(0.42) | 0.64<br>(0.36) | 0.85<br>(0.40) | 0.75<br>(0.23) |
| Remolacha     | 0.55<br>(0.44) | 1.19<br>(0.29) | 0.97<br>(0.18) | 0.91<br>(0.51) |
| Máiz          | 0.67<br>(0.36) | 0.73<br>(0.33) | 0.79<br>(0.38) | 0.74<br>(0.61) |
| Cereales Inv. | 0.24<br>(0.69) | 0.41<br>(0.85) | 0.45<br>(0.67) | 0.44<br>(0.81) |
| Girasol       | 0.29<br>(1.24) | 0.26<br>(1.34) | 0.34<br>(0.86) | 0.22<br>(1.36) |
| Olivo         | 0.33<br>(0.77) | 0.35<br>(0.88) | 0.46<br>(0.74) | 0.33<br>(0.92) |

Los valores entre paréntesis muestran el coeficiente de variación.

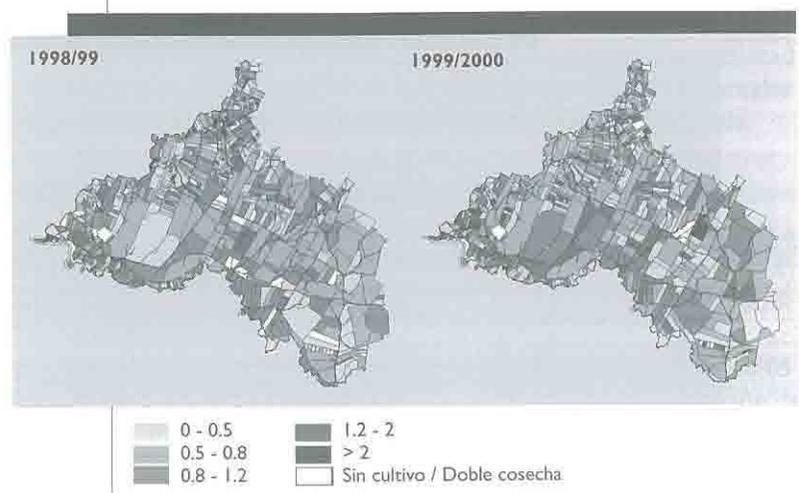
Todas estas observaciones son especialmente patentes en las dos primeras campañas (Mapa 11) estudiadas, en donde el riego fue

especialmente deficitario. En la última campaña estudiada se aprecia un incremento del índice en las parcelas de mayor tamaño al incrementarse el cultivo del ajo. Esta circunstancia se aprecia en el Mapa 12.

MAPA 11 Distribución del índice ARAR para las campañas 1996/97 y 1997/98



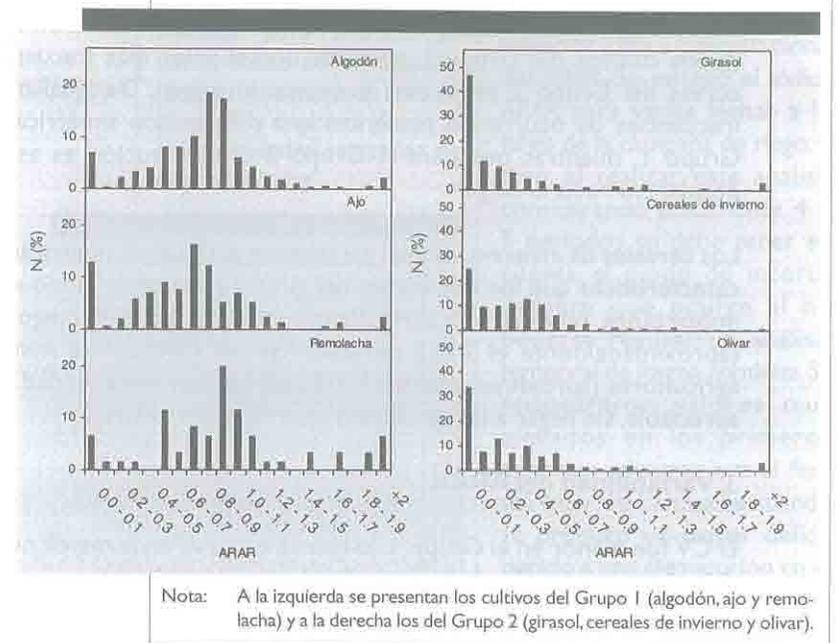
MAPA 12 Distribución del índice ARAR para las campañas 1998/99 y 1999/2000



Del examen de los valores del ARAR del Cuadro 5 se deduce que es posible distinguir dos grupos de cultivos (se ignoran los cultivos con poca superficie, que no exceden el 5-10% de la superficie total):

- Grupo 1: algodón, ajo, remolacha y maíz;
- Grupo 2: girasol, cereales de invierno y olivar;

GRÁFICO 3 Distribución de frecuencias de ARAR dentro de la zona regable



El primer grupo incluye cultivos de regadío, introducidos en la zona con la puesta en riego. El segundo grupo incluye los cultivos tradicionales de secano. La distinción de los dos grupos se hizo observando la distribución de frecuencias del índice por cultivos (Gráfico 3), las curvas de distribución de frecuencias acumuladas (Gráfico 4) y calculando algunos estadísticos (Cuadros 4 y 5):

### 1. ARAR medio ponderado

El ARAR medio ponderado por la superficie de los cultivos del Grupo 1 es superior al de los cultivos del Grupo 2 (Cuadro 5). Así, un cultivo característico del Grupo 1 como es el algodón, presenta valores medios ponderados que oscilan entre 0.70 y 0.75 (en las campañas lluviosas) y 0.87 en la campaña seca, mientras que el ARAR de un cultivo característico del Grupo 2 como el girasol, muestra valores que varían entre 0.22 y 0.34.

Dechmi et al. (1999) encontraron para la zona regable de La Loma de Quinto de Ebro en Zaragoza, valores medios relativamente bajos de ARAR para cultivos como el girasol (0.55 como valor mínimo) y el trigo (0.67 como valor mínimo), valores superiores a los encontrados en ZRGC.

## 2. Moda del ARAR

Por medio de las frecuencias de ocurrencia (Gráfico 3) y las curvas de distribución acumulada (Gráfico 4) se observa un desplazamiento a la derecha del valor más frecuente y de las curvas de distribución del ARAR de los cultivos del Grupo 1, mientras que el valor más frecuente y las curvas del Grupo 2 están muy próximas al origen. De igual modo las frecuencias de ocurrencia presentan una distribución simétrica para el Grupo 1, mientras que para el Grupo 2 la distribución es asimétrica desplazada hacia el origen.

Los cereales de invierno, aunque pertenecen al Grupo 2, muestran ciertas características que los diferencian del girasol y del olivar: aunque hay un importante número de agricultores que no aplican riego alguno (aproximadamente el 23%), también hay un significativo número de agricultores (aproximadamente el 10%) que aplican una cantidad de riego apreciable, sin llegar a las cantidades aportadas en el Grupo 1.

## 3. Variabilidad del ARAR

El CV fue menor en el Grupo 1, lo que se observa en la mayor pendiente del tramo intermedio de la curva de distribución. Mientras que el CV en los cultivos del Grupo 1 tomó valores entre 0.35 y 0.42, en el Grupo 2 varió entre 0.76 y 1.20, ocurriendo los valores menores en la campaña seca. Esta mayor variabilidad en los cultivos del Grupo 2, en un índice similar a ARAR, también fue encontrada por Faci et al. (2000) en la zona regable de Almodóvar (Huesca).

## 4. Porcentaje de parcelas donde el ARAR está entre 0.8 y 1.2

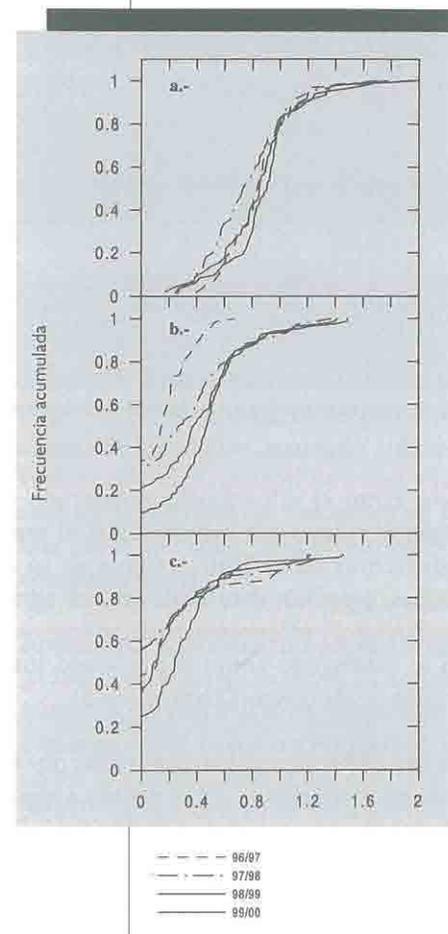
Este porcentaje fue superior en los cultivos del Grupo 1 que en los cultivos del Grupo 2. Así, en el algodón estuvo entre el 37% (en 1997/98) y el 60% (en 1998/99), mientras que en girasol varió del 2% (en 1999/2000) al 12% (en 1996/97).

## 5. Porcentaje de parcelas con riego claramente deficitario o excesivo

Siguiendo con el algodón y el girasol como cultivos representativos de los Grupos 1 y 2 respectivamente, el riego excesivo con seguridad para el

algodón osciló entre el 10% de las parcelas para la campaña seca y el 17% en las campañas húmedas. Sin embargo, para el girasol el riego excesivo osciló entre el 0% (en la campaña seca) y el 5% de las parcelas (en las campañas húmedas). Por otro lado, el riego deficitario con seguridad en algodón ocurrió en el 23% de las parcelas para la campaña seca y en el 45% de las parcelas para las campañas húmedas, frente a lo ocurrido con el girasol que osciló entre el 86% y el 97% de las parcelas.

**GRÁFICO 4**  
Curvas de frecuencia acumulada para evaluar la variabilidad de: a) algodón (Grupo 1), b) cereales de invierno (Grupo 2) y c) girasol (Grupo 2) para las cuatro campañas de riego estudiadas



Además del análisis espacial y por cultivos, se ha analizado la variación intra e interestacional del ARAR. Se estudió el índice ARAR para varias fechas a lo largo de la campaña de riego, si bien, al realizar este análisis considerando únicamente 4 ó 5 periodos se debe tener en cuenta el grado de incertidumbre que ocurre al no poderse realizar un análisis temporal de forma continua. Se encontraron valores muy elevados en los primeros periodos mientras que al final del ciclo del cultivo es cuando se produce un mayor déficit debido a una disminución en el aporte de riego (Cuadro 6). Esta circunstancia ocurre principalmente en los cultivos del Grupo 2, mientras que en los del Grupo 1 las diferencias entre periodos fueron menores.

Los valores excesivamente altos que aparecen en el Cuadro 6 se corresponden con periodos en donde los requerimientos óptimos simulados por el modelo son muy pequeños o incluso son nulos en algunos periodos en los que coinciden con lluvias o riegos abundantes previos.

Otros autores (Molden y Gates, 1990) realizaron un análisis similar empleando medidas semanales dentro de la campaña de riego tanto del agua distribuida como de las demandas de los cultivos. Se obtuvo que el ratio entre el agua aplicada y el riego requerido fue mayor en las primeras semanas y decrecía al final de la campaña de riegos. Estos estudios se realizaron en dos zonas regables localizadas en Sri Lanka, en donde el agua era distribuida por un sistema de rotaciones.

**CUADRO 6** Evolución del índice ARAR dentro de la campaña de riego para los principales cultivos de la zona regable

| Campaña   | Periodo                                    | Algodón | Ajo  | Cereales Inv. | Girasol | Olivo |
|-----------|--|---------|------|---------------|---------|-------|
| 1996-97   | Oct-Mar                                    | 2.27    | 0.77 | 0.22          | 0.85    | 0.53  |
|           | Abril-May                                  | 1.00    | 0.46 | 0.25          | 0.08    | 0.24  |
|           | Junio-Julio                                | 0.44    | -    | -             | 0.25    | 0.25  |
|           | Agos-Sept                                  | 1.28    | -    | -             | -       | 0.31  |
| 1997-98   | Oct- <sup>1/2</sup> Abril                  | 1.00    | 1.83 | 2.06          | 1.07    | 0.61  |
|           | <sup>1/2</sup> Abril-Jun                   | 0.57    | 0.31 | 0.17          | 0.09    | 0.20  |
|           | Jul- <sup>1/2</sup> Agos                   | 0.55    | -    | -             | 0.40    | 0.40  |
|           | <sup>1/2</sup> Agos-Sept                   | 1.30    | -    | -             | -       | 0.37  |
| 1998-99   | Oct- <sup>1/2</sup> Ene                    | -       | 1.48 | 1.39          | -       | 0.42  |
|           | <sup>1/2</sup> Ene-Marzo                   | 1.44    | 0.82 | 0.31          | 0.93    | 0.57  |
|           | Abril- <sup>1/2</sup> Junio                | 1.42    | 0.57 | 0.41          | 0.04    | 0.41  |
|           | <sup>1/2</sup> Junio- <sup>1/2</sup> Julio | 0.69    | -    | -             | 0.55    | 0.41  |
|           | <sup>1/2</sup> Julio-Sept                  | 0.22    | -    | -             | -       | 1.04  |
| 1999-2000 | Oct- <sup>1/2</sup> Feb                    | -       | 3.04 | 0.62          | -       | 0.10  |
|           | <sup>1/2</sup> Feb-May                     | 0.58    | 0.46 | 0.38          | 0.15    | 0.11  |
|           | Junio- <sup>1/2</sup> Julio                | 0.57    | 0.61 | -             | 0.29    | 0.27  |
|           | <sup>1/2</sup> Julio-Sept                  | 1.31    | -    | -             | -       | 1.16  |

La ausencia de valores indica que el cultivo aún no ha sido sembrado o ya ha sido cosechado.

En el análisis interestacional tanto el valor medio ponderado como el valor de la moda varía según el cultivo y la campaña. Así, el manejo del riego realizado por los agricultores en el Genil – Cabra se ve afectado por las condiciones climáticas, especialmente la lluvia. Los agricultores consideran si el año es o no lluvioso y en consecuencia, aplican un manejo del riego u otro. Si el año es catalogado como año lluvioso, los valores medios de ARAR son inferiores al año seco (Cuadros 4 y 5).

En análisis previos (Burt y Styles, 1999), se consideró el análisis por separado del ARAR en estaciones lluviosas y estaciones secas, debido a que el índice anual puede enmascarar lluvias abundantes en la estación lluviosa que no tendrían implicaciones serias sobre los cultivos aunque ARAR fuera bajo aunque sí durante el periodo seco. Por lo general se encontraron valores

de ARAR similares para ambas estaciones o incluso en algunas de las estaciones estudiadas decrecía el ARAR en la estación lluviosa.

En cultivos como los cereales de invierno se observa un gradual desplazamiento a la derecha en las curvas de frecuencia acumulada a lo largo de los años y que el porcentaje de agricultores que no aplicaron riego se ha reducido a lo largo del periodo estudiado, pasando del 33.7% en el año 1996/97 hasta el 21.4% en el año 1999/2000. Ambas circunstancias pueden suponer una mejora en la gestión del riego debido a la mayor experiencia de los agricultores. Igualmente se comprueba un incremento de la variabilidad del índice en las campañas lluviosas.

La gestión global del agua en una zona regable depende de cada agricultor en particular y por lo tanto habrá diferencias en la gestión del riego dentro de una misma zona regable. Las diferencias en el manejo del riego están influidas por varios factores: el asesoramiento sobre el riego realizado por los técnicos de la zona, la experiencia de los regantes en la gestión del riego y los cultivos presentes en la zona. Sin embargo, otros factores que afectan al manejo del riego que realizan los agricultores en otras zonas regables (Dechmi et al., 1999) como el tamaño de la parcela, el método de riego o el tipo de suelo, no mostraron ser determinantes de las variaciones en el manejo del riego en la zona regable del Genil – Cabra.

Los valores promedio de los índices de calidad del riego no aportan información sobre la dispersión de los índices entre agricultores individuales. Un valor medio correcto puede encubrir que el manejo del riego por defecto en unas parcelas se compensa con aportaciones de riego excesivas por parte de otros regantes. Así, considerando el valor medio de los índices, aparecen cultivos como el algodón que parece ser regado con una cantidad de riego adecuada (Cuadro 5), sin embargo, al analizar la distribución del índice en la zona, se observa que solamente una parte del total de agricultores está aplicando la cantidad de agua apropiada (Gráfico 4).

Analizando la distribución del ARAR, aparecen parcelas con cultivos como girasol o cereales de invierno en donde el riego aplicado es nulo, mientras que en otras parcelas el riego aplicado es correcto o incluso excesivo. Sin embargo, estos casos extremos son extraños de encontrar en cultivos como el algodón, maíz o ajo, donde la variabilidad es menor. La aparición de estos casos ocurre en cada campaña de riego, pero fue en la campaña seca donde se observó un menor número de parcelas con estas características. Este hecho es especialmente claro en las curvas de distribución del girasol (Gráfico 4c).

El estudio muestra que el manejo del agua en el año seco mejoró debido a la necesidad de aplicar más riego, porque la contribución de la lluvia fue muy pequeña, y quizás también a una mayor concienciación en el ahorro de agua. A pesar de la reducción en la variabilidad, en la campaña seca la dispersión observada en el Gráfico 4 fue todavía alta, especialmente en los cultivos del Grupo 2.

Estos valores indican una gran variabilidad en el comportamiento de los agricultores, especialmente si se tiene en cuenta que las condiciones de la zona regable (moderno sistema de riego, apoyo en cuestiones relacionadas con el riego por parte del gerente, etc.) que deberían de incrementar la uniformidad en la gestión del agua llevada a cabo por los agricultores.

La principal conclusión es que, aunque los valores medios del índice ARAR indiquen que la cantidad de agua aplicada en la zona es la correcta, la distribución individualizada del índice muestra diferencias importantes en la cantidad de riego aplicada por los agricultores, entre los que sólo una fracción alrededor del 50% aportan dotaciones cercanas a la correcta en el Grupo 1 e inferiores al 20% para los cultivos del Grupo 2.

**Aporte relativo anual de agua (ARAA) e índice de producción (IP)**

Los índices ARAA y IP presentan un comportamiento similar debido a que ambos están fuertemente relacionados entre sí.

CUADRO 7

Valor de ARAA e IP para los principales cultivos a lo largo de las cuatro campañas de riego

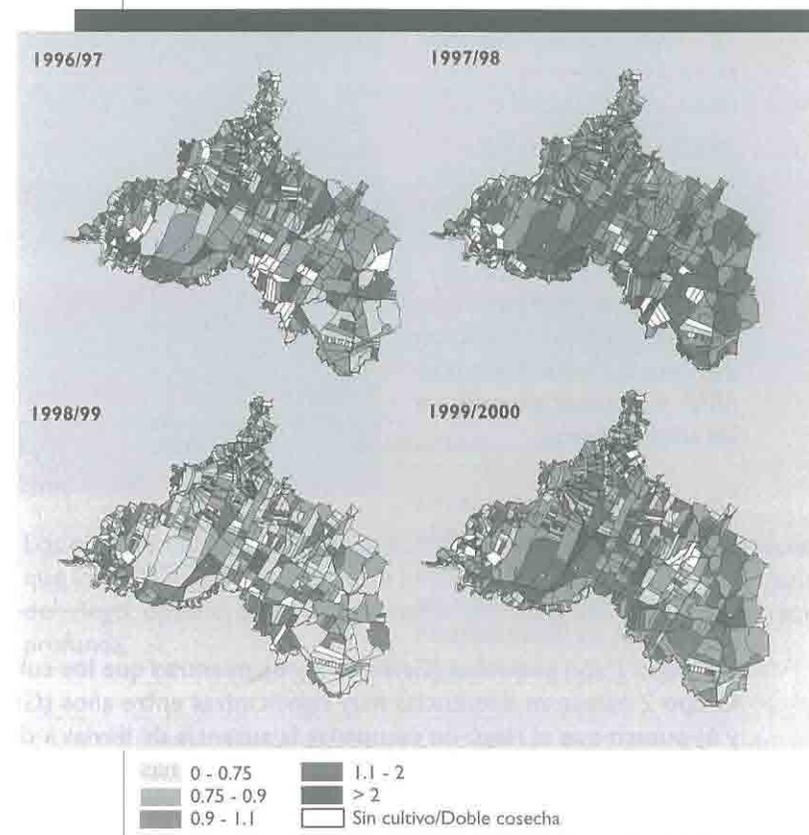
|               | ARAA<br>96/97  | ARAA<br>97/98  | ARAA<br>98/99  | ARAA<br>99/00  | IP-96/97       | IP-97/98       | IP-98/99       | IP-99/00       |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Algodón       | 0.89<br>(0.12) | 0.87<br>(0.14) | 0.89<br>(0.26) | 0.90<br>(0.19) | 0.90<br>(0.09) | 0.86<br>(0.10) | 0.90<br>(0.21) | 0.92<br>(0.16) |
| Ajo           | 0.88<br>(0.14) | 0.91<br>(0.07) | 0.88<br>(0.31) | 0.91<br>(0.07) | 0.87<br>(0.18) | 0.88<br>(0.10) | 0.91<br>(0.18) | 0.95<br>(0.04) |
| Remolacha     | 0.81<br>(0.13) | 1.05<br>(0.09) | 0.98<br>(0.15) | 0.96<br>(0.24) | 0.82<br>(0.15) | 0.98<br>(0.07) | 0.96<br>(0.11) | 0.94<br>(0.13) |
| Maíz          | 0.85<br>(0.13) | 0.88<br>(0.12) | 0.82<br>(0.31) | 0.84<br>(0.32) | 0.82<br>(0.21) | 0.85<br>(0.23) | 0.75<br>(0.29) | 0.84<br>(0.14) |
| Cereales Inv. | 0.73<br>(0.08) | 0.88<br>(0.08) | 0.57<br>(0.41) | 0.81<br>(0.15) | 0.57<br>(0.28) | 0.83<br>(0.15) | 0.64<br>(0.46) | 0.92<br>(0.11) |
| Girasol       | 0.80<br>(0.14) | 0.84<br>(0.09) | 0.46<br>(0.52) | 0.66<br>(0.20) | 0.65<br>(0.30) | 0.70<br>(0.21) | 0.27<br>(1.06) | 0.45<br>(0.45) |
| Olivo         | 0.76<br>(0.12) | 0.80<br>(0.12) | 0.60<br>(0.41) | 0.71<br>(0.19) | 0.85<br>(0.11) | 0.85<br>(0.10) | 0.69<br>(0.37) | 0.84<br>(0.13) |

Los valores entre paréntesis muestran el coeficiente de variación.

En los Mapas 13 y 14 se muestra la distribución espacial de los índices ARAA e IP para los cuatro años estudiados. Se observa que las campañas 1997/98 (debido a la alta pluviosidad) y 1999/2000 (debido a la pluviosidad y al aporte de riego) presentan valores de los índices mayores, mientras que en la campaña 1998/99 el valor de los índices es menor debido a la baja pluviosidad, no compensada suficientemente con el incremento de riego aportado.

Los valores medios de ARAA e IP muestran menores variaciones que el ARAR a lo largo de las cuatro campañas de riego (Cuadro 7). ARAA varió entre 0.87 (en 1997/98) y 0.72 (en 1998/99), mientras que IP varió en esos años entre 0.82 y 0.72.

MAPA 13 Distribución espacial del índice ARAA a lo largo de las cuatro campañas de riego analizadas



Comparando los resultados de ARAA con trabajos previos (Kloezen y Garcés-Restrepo, 1998; Molden et al., 1998; Burt y Styles, 1999) solamente

una zona presentó valores menores que el área estudiada. Sin embargo, las condiciones económicas y sociales son demasiado diferentes para realizar una correcta comparación. Los resultados más similares con los obtenidos en ZRGC se han encontrado en zonas en donde se realizó un aseso-ramiento al regante. También ha sido común encontrar los valores menores en zonas próximas al mar, en donde los excesos en el riego no pueden ser reutilizados (Burt y Styles, 1999).

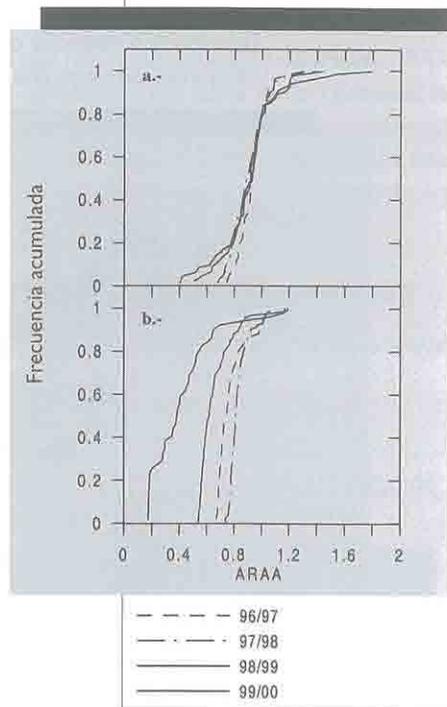
Analizando los valores medios por cultivos (Cuadro 7) y las curvas de frecuencia acumulada (Gráficos 5 y 6) tanto en ARAA como en IP, siguen siendo válidos los grupos de cultivos definidos anteriormente para el índice ARAR, aunque la lluvia aparece como un factor homogeneizador y por este motivo las diferencias entre cultivos son menores al analizar los índices ARAA e IP, especialmente en los años lluviosos.

Se ha realizado un análisis interestacional comprobando que la evolución de ambos índices depende del tipo de cultivo. Así, las diferencias en

el Grupo 1 son pequeñas (Gráficos 5 y 6), mientras que los cultivos del Grupo 2 muestran diferencias muy significativas entre años (Gráficos 5 y 6) puesto que el riego no compensa la ausencia de lluvias a diferencia de lo ocurrido en los cultivos del Grupo 1. Además, se ha encontrado en ambos índices un desplazamiento en las curvas hacia la izquierda (valores menores) cuanto más seco ha sido el año, especialmente en los cultivos del Grupo 2.

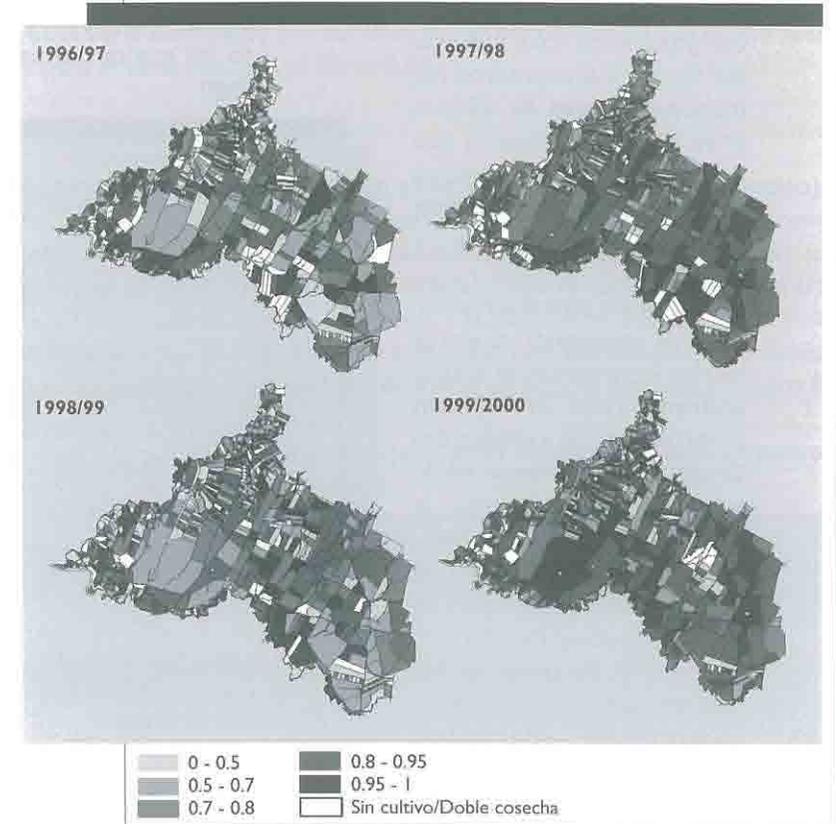
GRÁFICO 5

Curvas de frecuencia acumulada para evaluar la variabilidad del índice ARAA para a) algodón (Grupo 1) y b) girasol (Grupo 2) para cada una de las cuatro campañas de riego



MAPA 14

Distribución espacial del índice IP a lo largo de las cuatro campañas de riego analizadas



Los cultivos del Grupo 1 presentan un manejo del riego más apropiado que los del Grupo 2 aunque este hecho no implique que haya un manejo del riego óptimo, pues puede haber pérdidas de agua por filtración profunda.

De este modo para los cultivos del Grupo 1, aunque la lluvia fue escasa, los índices ARAA e IP no cayeron en la campaña seca. Los cultivos del Grupo 2 presentaron los menores valores de ARAA e IP en el año seco, pese a que en este año estos cultivos tienen los valores mayores de ARAR.

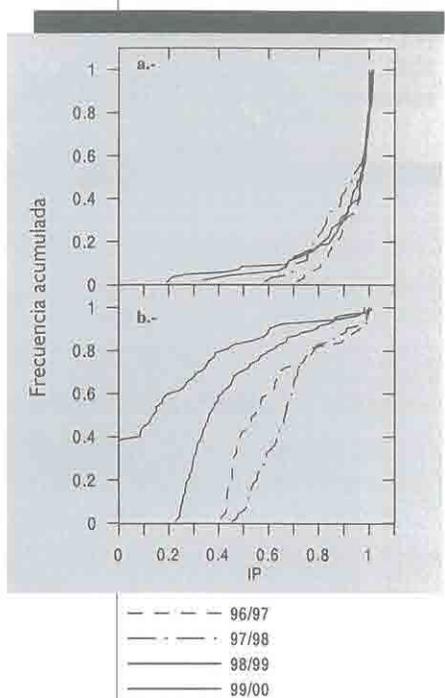
En la campaña seca el agricultor trata de compensar el estrés hídrico incrementando el agua aplicada (ver ARAR), sin embargo, en los cultivos del Grupo 2 el incremento no es suficiente para compensar la falta de lluvia y ARAA e IP caen, sin embargo en el Grupo 1 se consigue compensar la falta de lluvia y los valores de ARAA e IP no caen. El descenso en los índices del Grupo 2 está causado por una pobre utilización del riego en estos cultivos.

Con la variabilidad de los índices ARAA e IP ocurre algo similar a lo observado para ARAR: el comportamiento es diferente dependiendo de la campaña de riego (Gráficos 5 y 6).

Los índices muestran muy baja variabilidad en las campañas lluviosas incrementándose de forma importante en las campañas secas, debido al papel de la lluvia como amortiguador de los índices. En la campaña seca la alta variabilidad del índice ARAR influye sobre la variabilidad de los índices ARAA e IP debido a que estos apenas son alterados por la escasa lluvia. En cultivos en donde la cantidad de agua aportada es próxima a la óptima, el incremento en la variabilidad es menor mientras que en cultivos infraregados el incremento es grande (Gráficos 5 y 6).

GRÁFICO 6

Curvas de frecuencia acumulada para evaluar la variabilidad de IP a) para algodón y b) girasol, a lo largo de las cuatro campañas de riego



El coeficiente de variación (CV) del índice ARAA varía desde 0.13 en las campañas lluviosas hasta 0.43 en la campaña seca. Para el índice IP, el CV varía desde 0.18 en las campañas lluviosas hasta 0.44 en el año seco. Estos incrementos son especialmente altos para el Grupo 2, en donde CV para ARAA varía desde 0.09 (en los años lluviosos) hasta 0.42 (en el año seco) y para IP varía desde 0.14 hasta 0.63.

### Índice de drenaje (ID)

Los valores medios de ID oscilan entre 0.017 (años con aporte escaso) y 0.024 (años con alto aporte de riego) (Cuadro 4). El índice está claramente influenciado por la profundidad radicular, y así, cultivos como el ajo que presenta un sistema radicular superficial muestra valores altos, mientras que otros cultivos como el algodón y la remolacha, con un importante aporte de agua vía riego, también presentan valores elevados de ID debido a un exceso en el agua aplicada ocurrido en algunas parcelas (Cuadro 8).

CUADRO 8

Valor de ID para los principales cultivos a lo largo de las cuatro campañas de riego

|               | ID - 96/97     | ID - 97/98     | ID - 98/99     | ID - 99/00     |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Olivar        | 0.01<br>(0.03) | 0.01<br>(0.03) | 0.01<br>(0.06) | 0.00<br>(0.01) |
| Girasol       | 0.00<br>(0.01) | 0.00<br>(0.01) | 0.00<br>(0.00) | 0.00<br>(0.02) |
| Cereales Inv. | 0.00<br>(0.00) | 0.01<br>(0.04) | 0.00<br>(0.02) | 0.01<br>(0.02) |
| Remolacha     | 0.01<br>(0.03) | 0.07<br>(0.09) | 0.02<br>(0.05) | 0.02<br>(0.12) |
| Algodón       | 0.03<br>80.04  | 0.04<br>(0.05) | 0.01<br>(0.06) | 0.02<br>(0.03) |
| Ajo           | 0.05<br>(0.10) | 0.02<br>(0.04) | 0.06<br>(0.10) | 0.03<br>(0.04) |
| Maíz          | 0.05<br>(0.04) | 0.05<br>(0.05) | 0.03<br>(0.08) | 0.01<br>(0.12) |

Los valores entre paréntesis muestran el coeficiente de variación.

### Índices económicos de calidad del riego

Analizando los dos índices de calidad del riego se ha constatado un diferente comportamiento de PA y de PMA (Cuadro 9).

El primero es claramente dependiente de las condiciones climáticas y del manejo del riego llevado a cabo por el agricultor. El descenso

provocado en el año seco es debido a un descenso en la producción del cultivo en este año (ver índice *IP*) y a un incremento en la cantidad de riego aplicada.

La reducción de la producción en el año seco depende del cultivo, así, para el algodón las variaciones en la producción fueron muy escasas, mientras que para el girasol en las campañas secas se produjeron descensos de hasta el 66% frente a las campañas lluviosas. Sin embargo, el incremento en el riego aplicado en el año seco es muy importante llegando a incrementarse más del 100% en algunos cultivos (especialmente pertenecientes al Grupo 2) frente a las campañas lluviosas.

**CUADRO 9** Valor de PA y PMA para los principales cultivos a lo largo de las cuatro campañas de riego en €/m<sup>3</sup>

|               | 1996/97        |                | 1997/98        |                | 1998/99        |                | 1999/2000      |                |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|               | PA             | PMA            | PA             | PMA            | PA             | PMA            | PA             | PMA            |
| Algodón       | 0.77<br>(0.19) | 0.53<br>(0.15) | 1.00<br>(0.26) | 0.60<br>(0.18) | 0.41<br>(0.14) | 0.41<br>(0.14) | 0.90<br>(0.22) | 0.75<br>(0.18) |
| Ajo           | 3.12<br>(0.26) | 2.21<br>(0.18) | 6.52<br>(0.30) | 2.19<br>(0.10) | 1.87<br>(0.22) | 1.87<br>(0.22) | 3.41<br>(0.23) | 0.87<br>(0.15) |
| Remolacha     | 1.24<br>(0.26) | 0.58<br>(0.11) | 1.29<br>(0.31) | 0.54<br>(0.20) | 0.60<br>(0.10) | 0.60<br>(0.10) | 1.14<br>(0.60) | 0.63<br>(0.25) |
| Maíz          | 0.32<br>(0.15) | 0.27<br>(0.11) | 0.32<br>(0.28) | 0.23<br>(0.08) | 0.18<br>(0.08) | 0.18<br>(0.08) | 0.28<br>(0.20) | 0.25<br>(0.20) |
| Cereales Inv. | 0.90<br>(0.37) | 0.32<br>(0.08) | 1.21<br>(0.65) | 0.24<br>(0.15) | 0.35<br>(0.15) | 0.35<br>(0.15) | 1.16<br>(0.59) | 0.22<br>(0.22) |
| Girasol       | 0.62<br>(0.63) | 0.16<br>(0.15) | 1.10<br>(0.72) | 0.20<br>(0.17) | 0.09<br>(0.53) | 0.09<br>(0.53) | 0.43<br>(0.58) | 0.15<br>(0.12) |
| Olivo         | 2.37<br>(0.74) | 0.49<br>(0.25) | 3.95<br>(0.77) | 0.43<br>(0.14) | 1.13<br>(0.42) | 1.13<br>(0.42) | 1.90<br>(1.08) | 0.42<br>(0.24) |

Los valores entre paréntesis muestran el coeficiente de variación.

En trabajos recientes localizados en dos grandes zonas regables en Turquía, (Droogers y Kite, 2001), se han encontrado valores de *PA* para el algodón ligeramente inferiores a los encontrados en ZRGC. De igual modo los valores más bajos de este índice ocurrieron en los años donde la cantidad de riego aplicada fue mayor.

Con los valores medios obtenidos (Cuadros 4 y 9) es fácil hacer comparaciones con los índices encontrados en otras zonas. De entre un gran número de zonas regables localizadas en Andalucía (CAP, 1999; Corominas, 2000), sólo un 10% de éstas presentan valores de productividad de agua mayores que los encontrados en la zona regable del Genil – Cabra, debido a la existencia de cultivos con alta

productividad del agua como olivar o ajo y al reducido consumo de agua en la ZRGC. Previsiblemente las zonas que superan a la ZRGC engloban gran cantidad de cultivos hortícolas.

Comparando la *PA* de la ZRGC con la de zonas regables más alejadas económica y socialmente (Molden et al., 1998; Burt y Styles, 1999; Molden et al., 2001), el valor de *PA* en ZRGC aparece como el mayor. Hay dos factores que explican este hecho: un alto porcentaje de arroz plantado en las zonas analizadas por estos autores, el cual presenta valores de *PA* inferiores a los restantes cultivos, y un mayor consumo de agua para riego existente en esas zonas de menor pluviosidad y de sistemas de distribución con mayores pérdidas.

El índice *PMA* no presenta variaciones importantes a lo largo de las cuatro campañas de riego, debido a que la producción del cultivo en condiciones de secano homogeniza la evolución del índice a lo largo de las cuatro campañas de riego: si el año es seco se produce un incremento en la producción al pasar de secano a regadío y también se incrementa el riego, si el año es lluvioso, el incremento de producción de secano a regadío es escaso pero el aporte de riego también lo es.

La variación interestacional ha sido analizada para los índices *PA* y *PMA*. En el índice *PA* se ha observado que el valor medio cae cuando el año es seco (1.99 €/m<sup>3</sup> vs. 0.72 €/m<sup>3</sup> en el año seco). El valor mínimo aparece en la campaña 1998/99 (Cuadro 4) debido a la caída en el rendimiento de los cultivos (ver índice *IP*) y al incremento simultáneo del riego aportado. Sin embargo, con el índice *PMA* estas diferencias a lo largo de las campañas de riego no son apreciadas debido a la existencia de otros factores que homogeneizan el valor del índice. El factor principal que evita grandes diferencias entre años a pesar de registrarse diferente pluviosidad es la inclusión de la producción en condiciones de secano. De este modo, el índice *PMA* osciló entre 0.56 €/m<sup>3</sup> (campaña 97/98) y 0.72 €/m<sup>3</sup> (campaña 96/97).

Con el análisis de la productividad marginal del agua para cada cultivo se logra determinar los cultivos en los cuales un aporte adicional de agua implicaría un mayor incremento en los ingresos brutos. Ajo, olivar, remolacha y algodón, considerando únicamente los cultivos más frecuentes en la zona, son los cultivos con mayores valores de *PMA*, mientras que cereales de invierno, girasol y maíz han presentado los valores más bajos. Howell (2001) obtuvo valores de *PMA* para maíz en una zona regable de Texas. Los valores obtenidos por este autor, cuando el maíz era regado sin déficit, fueron muy similares a los encontrados en la ZRGC.

### Combinación de los índices de calidad del riego para la evaluación de la zona regable

Se ha realizado una regresión simple entre *IP* y los restantes índices de calidad del riego para cada parcela individual de la zona regable. *ARAA* es el índice que muestra mejor ajuste con *IP* a lo largo de las cuatro campañas de riego ( $r^2$  varía entre 0.69 y 0.87) mientras que el *ID* muestra el peor ajuste (ajustes no significativos). La correlación entre *IP* y *ARAR* depende del modo en que se está realizando el manejo del riego en cada campaña. Así,  $r^2$  presenta un valor elevado en la campaña seca ( $r^2 = 0.86$ ), mientras que en las campañas lluviosas el valor de  $r^2$  es menor (0.58).

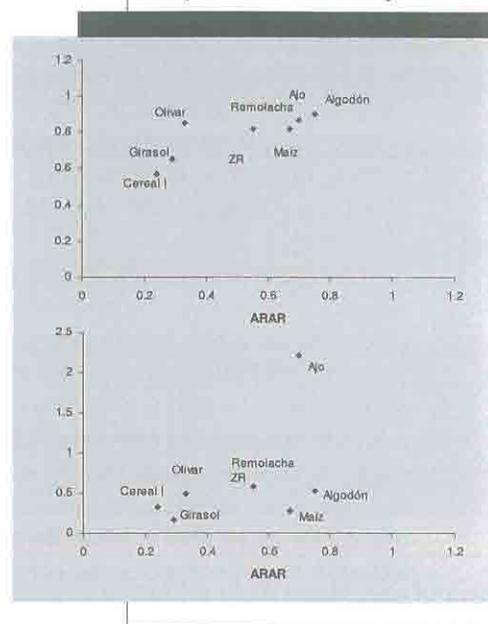
Con el uso de tres índices de calidad del riego es posible analizar el manejo del agua en una zona regable e identificar vías que contribuyan a la mejora en el uso del agua. Los Gráficos 7a y 8a muestran la correlación entre *ARAR* e *IP* para los distintos cultivos.

Un valor alto de *ARAR* (superior a 1) junto a un valor elevado de *IP* indicaría un riego excesivo (caso de la remolacha en las tres últimas campañas), mientras que un bajo valor de *ARAR* y un alto valor de *IP* indicaría que se está realizando un riego insuficiente pero bien distribuido. Valores de *ARAR* alrededor de 1, con bajo *IP* indicarían que la cantidad total de agua es apropiada pero no el momento de aplicación.

Si la cantidad de agua disponible es insuficiente para abastecer a todos los cultivos de la zona, es necesario elegir en qué cultivos es más productivo aplicar el agua, para lo cual se incluyó el *PMA* que indica la productividad del agua de riego para un cultivo o zona regable (Gráficos 7 y 8).

GRÁFICO 7

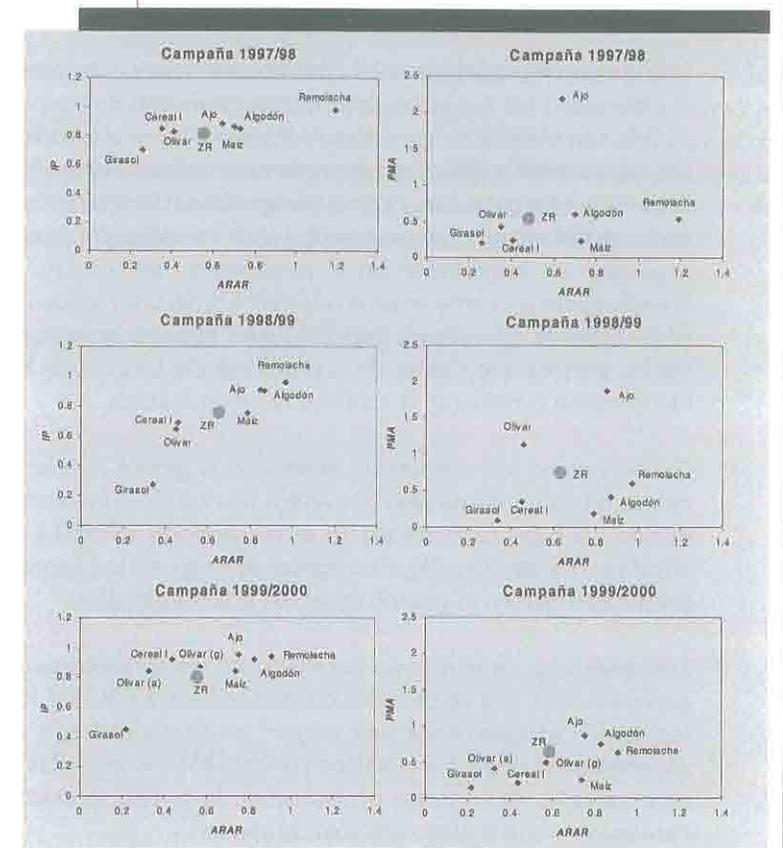
Posicionamiento de cada cultivo y de la zona regable usando índices de calidad del riego para la campaña de riegos 1996/1997. a) comparación entre *IP* y *ARAR*, b) comparación entre *PMA* y *ARAR*



Los cultivos localizados en la zona superior del esquema son los cultivos en los cuales el agua es más productiva, por lo que un incremento en el agua aplicada a estos, implicaría un mayor incremento en la productividad económica del agua. Valores de *ARAR* altos con *PMA* muy baja (maíz) indica que puede ser conveniente una reducción del riego aportado.

GRÁFICO 8

Evolución del posicionamiento de cada cultivo y de la zona regable para las campañas 1997/98 hasta 1999/2000, usando índices de calidad del riego



La campaña 1996/97 se mostró en el Gráfico 7. a) comparación entre *IP* y *ARAR*, b) comparación entre *PMA* y *ARAR*

Una alta productividad marginal del agua no implica necesariamente que convenga un incremento en el riego aplicado puesto que es necesario comprobar el valor del índice *ARAR*. Si este valor es mayor que uno, implica

la aportación del riego es excesiva y se pueden estar produciendo pérdidas de agua por filtración profunda. Por lo tanto, un incremento en el riego aplicado no sería apropiado a pesar de que el agua aplicada al cultivo tenga una alta productividad.

La distancia desde donde se sitúa el cultivo o zona regable hasta el punto donde ARAR vale 1 indica el margen para incrementar el agua aplicada sin que se exceda la cantidad óptima. Es importante considerar la variabilidad del índice dentro de la zona, como anteriormente ha sido estudiado, que podría causar importantes distorsiones entre el valor medio y el valor individual en cada parcela.

Usando esta metodología se ha obtenido información útil acerca de la zona regable estudiada. Así, empleando valores promedio de los índices, el olivar y el ajo son cultivos en los cuales un incremento en el agua aplicada podría ser recomendable debido a que presentan valores bajos de ARAR y altos de PMA. Sin embargo, cultivos como el algodón están próximos a un manejo eficiente del riego y un incremento en la cantidad de agua aportada no implicaría un incremento en el rendimiento del cultivo. Pese a estas consideraciones y como se vió en el Gráfico 4, hay una cantidad relativamente importante de agricultores para los cuales estas recomendaciones no son válidas, y en los que a pesar de usar cultivos del Grupo I es necesario que incrementen o reduzcan la cantidad de riego aplicada.

Cultivos como los cereales de invierno o el girasol, a pesar de sus bajos niveles de aplicación de agua (ver ARAR), no requieren incrementos de riego debido a la baja productividad del agua cuando es aplicada a estos cultivos (Gráficos 7 y 8). Si se llegara a aplicar el riego, en los cereales sería más productivo que en el girasol, según los precios actuales.

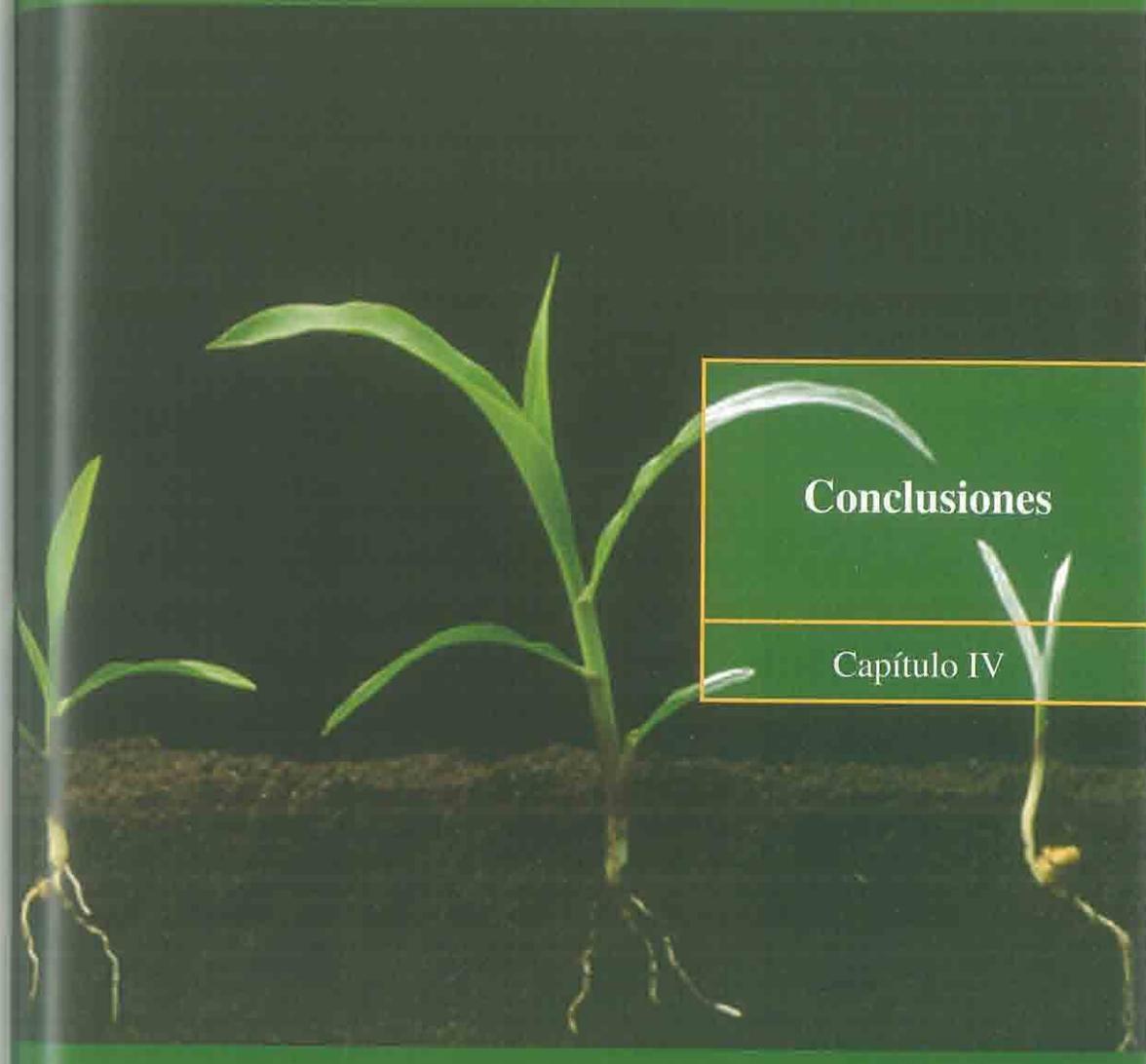
Las tendencias en el manejo del riego por los agricultores siguen pautas parecidas a las que se deducen de los Gráficos 7 y 8. Así, los cultivos en los cuales el agua tiene una mayor productividad son regados más abundantemente que los que tienen un bajo PMA. Además, las subvenciones para cereales de invierno procedentes de la PAC probablemente han conducido a que el riego sea sólo de apoyo.

A los Gráficos 7 y 8 se le puede incluir un umbral el cual incluya el coste del agua y el de la aplicación del riego. En la zona regable estudiada, el coste del agua varía entre 0.016 y 0.02 €/m<sup>3</sup> y el coste de aplicación ha sido de 27.13 € por hectárea y riego. Con esta información, en esta zona se ha definido un umbral de rentabilidad a partir del cual la aplicación del riego es rentable y este valor se sitúa en torno a 0.05 €/m<sup>3</sup>.

El coste del agua en ZRGC está próximo al coste medio del agua en la región (CAP, 1999) aunque es muy alto si se compara con otras zonas más alejadas (Burt y Styles, 1999), que varía desde 0 hasta 0.02 €/m<sup>3</sup>, aunque en términos generales el coste no excede de 0.005 €/m<sup>3</sup>, lo cual explica las grandes dosis de agua aplicada en estas zonas.

Volviendo al esquema, si algún cultivo o zona estuviera situado bajo este umbral la aplicación del riego no sería rentable. El valor de este umbral no es traspasado por ningún cultivo en ninguna de las campañas estudiadas, si bien los valores de PMA del girasol, especialmente en la campaña 1998/1999 están muy próximos a dicho umbral (Gráfico 8).

El Gráfico 8 permite ver además la evolución de las relaciones entre índices a lo largo de los cuatro años analizados. Así, se comprueba como los cultivos con alto valor de PMA son siempre los mismos e igual ocurre con los que presentan los valores más bajos. La caída de PMA en el cultivo del ajo se ha debido fundamentalmente a una caída de los precios en las dos últimas campañas de riego, especialmente en la 1999/2000.



**Conclusiones**

Capítulo IV

#### IV. CONCLUSIONES

Para analizar la zona regable del Genil – Cabra se han empleado una serie de índices de calidad del riego. El índice principal ha sido el aporte relativo anual de riego (*ARAR*), que ha oscilado entre 0.45 y 0.64 a lo largo de las cuatro campañas analizadas, lo que indica que el riego en la zona regable es claramente deficitario. Sin embargo el análisis de la zona no estará completo si no es complementado con otros índices.

Una característica interesante en el manejo del agua en la zona regable del Genil – Cabra es el ajuste por parte del agricultor a las restricciones impuestas por la climatología. Así, cuando la precipitación anual es escasa, los agricultores ajustan el agua aplicada a las condiciones climáticas, incrementando el valor de *ARAR*. Cuando la campaña es húmeda, el valor de *ARAR* se reduce, al sobrestimar la contribución de la lluvia para suplir las necesidades de los cultivos. Sin embargo, se ha determinado que el incremento en el riego en los años secos no es suficiente y los rendimientos se resienten.

Al estudiar el manejo del riego por parte de los agricultores han aparecido dos grupos de cultivos: El primero lo componen el algodón, el ajo, el maíz y la remolacha, mientras que en el segundo grupo se incluyen cultivos como los cereales de invierno, el girasol y el olivar. En el primer caso, el índice *ARAR* está alrededor de 1 siendo su variabilidad relativamente pequeña, sin embargo, para el segundo grupo los valores de *ARAR* son mucho menores y la variabilidad entre agricultores se incrementa.

El valor medio de los índices de calidad del riego facilita un análisis global para evaluar tendencias a lo largo del tiempo pero no son suficientes para caracterizar el comportamiento del sistema. Por lo tanto, es necesario determinar la variabilidad en la gestión del agua entre agricultores. Así, en cultivos como el algodón que muestran valores medios que indicarían un correcto manejo del riego, aparece un porcentaje significativo de parcelas (mayor del 30% en todas las campañas) que son regadas de forma incorrecta.

Combinando *ARAR* y el índice de productividad (*IP*) se ha determinado qué cultivos requieren mejorar la gestión del riego y cuales requieren incrementar la cantidad de agua aplicada. Combinando *ARAR* y la productividad marginal del agua (*PMA*) se ha determinado en cuales de los cultivos analizados, un incremento en el agua aplicada sería más rentable.

Así, a lo largo de las cuatro campañas, el olivar y el ajo se han mostrado como los cultivos en donde un incremento en la aplicación de riego sería más productivo, mientras que en cultivos como los cereales de invierno o el girasol, a pesar de que su riego es muy escaso, no es conveniente incrementarlo desde un punto de vista de productividad del agua.

El uso de Sistemas de Información Geográfica ha permitido el análisis de la distribución espacial de los índices. De este modo se han determinado las zonas en donde el manejo del riego está más próximo al correcto y zonas en donde el manejo del riego tiene que ser especialmente mejorado. Finalmente, una moderna zona regable como la estudiada, ha mostrado una considerable dispersión entre el comportamiento de los agricultores, por lo tanto, en zonas regables más antiguas en las cuales el asesoramiento al regante no es frecuente, es de esperar que la variabilidad en el manejo del agua sea extraordinariamente alta. Por lo tanto, el uso de un índice de calidad del riego general para definir a la totalidad de la zona generaría serias restricciones, especialmente cuando se realizan recomendaciones generales acerca del manejo del riego.

## Bibliografía

- 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. *Journal of Hydrology* 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. *Journal of Hydrology* 299, 27-41.
- Anyoji, H y Wu, I.P., 1994. Normal distribution water application for drip irrigation schedules. *Transaction of the ASAE* 37(1), 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.
- Bos, M.G., 1997. Performance indicators for irrigation and drainage. *Irrigation and Drainage Systems* 11(2), 119-137.
- Bos, R., 2000. ICID Guidelines on Performance Assessment. Working group on performance indicators and benchmarking. FAO. Roma. Italia.
- 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.
- CAP, 1999. Inventario y caracterización de los regadíos de Andalucía. Sevilla.
- Coelho M.B., Villalobos, F.J., Mateos, L., 2003. Modeling root growth and the soil-plant-atmosphere continuum of cotton crops. *Agricultural Water Management* 60, 99-118.

- Corominas, J., 2000. Mas allá de la modernización de los regadíos. XVIII Congreso Nacional de Riegos. AERYD.
- 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. y Kite, G., 2001. Estimating productivity of water at different spatial scales using simulation modeling. Research Report 53. *International Water Management Institute*. Colombo. Sri Lanka.
- 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 Science* 19, 139-145.
- 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. *Agronomy Journal* 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. *Agricultural Water Management* 42, 313-334.
- Hartkamp, A.D., White, J.W. y Hoogenboom, G., 1999. Interfacing Geographic Information Systems with Agronomic Modeling: A Review. *Agronomy Journal* 91, 761-772.
- Howell, T.A., 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agronomy Journal* 93, 281-289.
- Kalu, I.L., Paudyal, G.N. y Gupta, A.D., 1995. Equity and efficiency issues in irrigation water distribution. *Agricultural Water Management* 28, 335-348.

- Kloezen, W.H. y Garcés-Restrepo, C., 1998. Assessing irrigation performance with comparative indicators: The case of the Alto Rio Lerma Irrigation District, Mexico. Research Report 22. *International Water Management Institute*. Colombo. Sri Lanka.
- Leenhardt, D. y Lemaire, Ph., 2002. Estimating the spatial and temporal distribution of sowing dates for regional water management. *Agricultural Water Management* 55, 37-52.
- 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. *Agricultural Systems* 50, 169-189.
- Mantovani, E.C., Villalobos, F.J., Orgaz, F. y Fereres, E., 1995. Modelling the effects of sprinkler irrigation uniformity on crop yield. *Agricultural Water Management* 27, 243-257.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1998. Plan Nacional de Regadíos (Horizonte 2007). MAPA. Madrid, 229p.
- 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.
- Moden, D.J., Sakthivadivel, R., Perry, C.J., de Fraiture, C. y Kloezen, W.H., 1998. Indicators for Comparing Performance of Irrigated Agricultural Systems. Research Report 20. *International Water Management Institute*. Colombo. Sri Lanka.
- Querner, E.P., Morábito, J.A., Manzanera, M., Pazos, J.A., Ciancaglini, N.C. y Menenti, M., 1997. The use of hydrological models in the irrigated areas of Mendoza, Argentina. *Agricultural Water Management* 35, 11-28.
- 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. *Agricultural Water Management* 21, 145-154.

- 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. *Agricultural Water Management* 32, 181-195.
- Shih, S.F. y Jordan, J.D., 1991. Use of Landsat thermal-IR data and GIS in soil moisture assessment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 119(5), 868-879.
- Taylor H.M., 1983. Managing root systems for efficient water use: An overview. Capítulo 3. 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. *Agricultural Water Management* 13, 113-125.
- Williams, J.R., Jones, C.A., Kiniry, J.R. y Spanel, A., 1989. The EPIC Crop Growth Model. *Transactions of the ASAE* 32(2), 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. *Transactions of the ASAE* 31(6), 1743-1749.



ISBN 84-95191-63-6



9 788495 191632



Unicaja  
Fundación