



TESIS DOCTORAL

# MODELO DE SIMULACIÓN DE FLUJOS DE AGUA PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LA MODERNIZACIÓN Y GESTIÓN DE COMUNIDADES DE REGANTES

SERGIO LECINA BRAU

ZARAGOZA, JUNIO DE 2004



Universitat de Lleida



Escuela Técnica Superior  
de Ingeniería Agraria  
UdL



Laboratorio Asociado de Agronomía y  
Medio Ambiente (DGA-CSIC)



Estación Experimental  
de Aula Dei  
CSIC

## **Artículos de esta Tesis publicados en revistas científicas internacionales SCI:**

### ***Revistas europeas:***

**Lecina, S.**, Martínez-Cob, A., Pérez, P.J., Villalobos, F.J., Baselga, J.J. 2003. Fixed versus variable bulk canopy resistance for reference evapotranspiration estimation using the Penman-Monteith equation under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, 60, 181-198.  
[www.elsevier.com](http://www.elsevier.com)

**Lecina, S.**, Playán, E. Isidoro, D. Dechmi, F. Causapé, J. y Faci, J.M. 2005. Irrigation evaluation and simulation at the irrigation district V of Bardenas (Spain). *Agricultural Water Management*, 73: 223-245.  
[www.elsevier.com](http://www.elsevier.com)

### ***Revistas estadounidenses:***

**Lecina, S.**, Playán, E. 2006. A model for the simulation of water flows in irrigation districts: I. Description. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 132(4):310-321.  
[www.ascelibrary.org](http://www.ascelibrary.org)

**Lecina, S.**, Playán, E. 2006. A model for the simulation of water flows in irrigation districts: II. Application. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 132(4):322-331.  
[www.ascelibrary.org](http://www.ascelibrary.org)

### **Sergio Lecina Brau**

Departamento de Genética y Producción Vegetal  
Laboratorio Asociado de Agronomía y Medio Ambiente (DGA-CSIC)  
Estación Experimental de Aula Dei, CSIC  
Apdo. 202, 50080 Zaragoza (España)

[lecina@eead.csic.es](mailto:lecina@eead.csic.es)  
[www.eead.csic.es](http://www.eead.csic.es)

TESIS DOCTORAL

# MODELO DE SIMULACIÓN DE FLUJOS DE AGUA PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LA MODERNIZACIÓN Y GESTIÓN DE COMUNIDADES DE REGANTES

Memoria presentada por **SERGIO LECINA BRAU** en satisfacción  
de los requisitos necesarios para optar al grado de Doctor

**Directores:**

**DR. ENRIQUE PLAYÁN JUBILLAR**  
Laboratorio Asociado de Agronomía y Medio Ambiente DGA-CSIC  
EE AULA DEI-CSIC

**DR. ANTONIO MARTÍNEZ-COB**  
Laboratorio Asociado de Agronomía y Medio Ambiente DGA-CSIC  
EE AULA DEI-CSIC

**Tutor:**

**DR. JOSEP M<sup>a</sup> VILLAR i MIR**  
Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo  
ETSIA-UdL

ZARAGOZA, JUNIO DE 2004



**A mis padres,  
Emilio y Aurora**

## Agradecimientos

A los Doctores Enrique Playán y Antonio Martínez-Cob, directores de esta Tesis, de cuyas enseñanzas y ejemplo en el trabajo he adquirido unos conocimientos científicos, técnicos y humanos fundamentales para mi desarrollo profesional y personal. Una parte importante de mis futuros logros será debida a ellos.

Al Doctor Josep María Villar, tutor de esta Tesis, por su ayuda desde la Universidad de Lleida en la realización de mis estudios de doctorado y en la finalización de esta Tesis.

Al personal del grupo de riegos del Departamento de Genética y Producción Vegetal de la Estación Experimental de Aula Dei (EEAD-CSIC), y de la Unidad de Suelos y Riegos del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria del Gobierno de Aragón (CITA), cuya acogida y enseñanzas me hacen sentir orgulloso del lugar en el que he desarrollado mi Tesis Doctoral.

Al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), por la beca de introducción a la investigación que me permitió comenzar a trabajar con mis directores, y al Consejo Superior de Investigación y Desarrollo del Gobierno de Aragón (CONSI+D), por la beca predoctoral que me permitió financiar los primeros años de doctorado.

Al Ministerio de Ciencia y Tecnología del Gobierno Español y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) de la Unión Europea, al financiar los proyectos de investigación en los que se ha desarrollado esta Tesis.

Al Laboratorio Asociado de Agronomía y Medio Ambiente (DGA-CSIC) y al Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo de la Universidad de Lleida, por permitirme realizar mis estudios de doctorado en sus centros e instalaciones.

Al personal de la Comunidad de Regantes V del Canal de Bardenas y a sus servicios técnicos, por su decidida apuesta por la mejora de su regadío, y cuya ayuda, junto con la de sus regantes, ha sido decisiva en el desarrollo de esta Tesis.

A mi amigo y compañero de trabajo en la empresa en la que desarrollo mi labor profesional desde hace varios años, por su confianza y paciencia.

Y por supuesto, a mi hermana Isabel, y al resto de mi familia por su apoyo incondicional.

# Índice General

---

<b>Índice General</b> .....	<b>I</b>
<b>Índice de Tablas</b> .....	<b>V</b>
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>VII</b>
<b>Glosario de símbolos</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Documento de Síntesis</b> .....	<b>XVII</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>XXIV</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>XXVI</b>
<b>Resum</b> .....	<b>XXVIII</b>
<b>1. Introducción general</b> .....	<b>1</b>
1.1 Introducción general.....	3
1.2 Referencias .....	9
<b>2. Valores variables de la resistencia de la cubierta vegetal:     evaluación de su uso en la ecuación de Penman-Monteith     en condiciones semiáridas</b> .....	<b>13</b>
2.1 Introducción .....	15
2.2 Material y métodos .....	17
2.2.1 Descripción de las zonas experimentales.....	17
2.2.1.1 El valle del Ebro.....	17
2.2.1.2 El valle del Guadalquivir.....	20

2.2.2 Cálculos de $ET_0$ .....	21
2.2.2.1 La ecuación de Penman-Monteith .....	21
2.2.2.2 El modelo de Katerji y Perrier .....	22
2.2.2.3 El modelo de Todorovic .....	24
2.2.3 Análisis estadísticos .....	25
2.3 Resultados y discusión.....	26
2.3.1 Estimación con valores de $r_c$ fijos .....	26
2.3.2 Calibración del modelo de Katerji y Perrier.....	29
2.3.3 Estimación con valores de $r_c$ variables.....	30
2.4 Conclusiones .....	38
2.5 Referencias .....	39

### **3. Evaluación y mejora de los riegos de la Comunidad de Regantes V del Canal de Bardenas..... 43**

3.1 Introducción .....	45
3.2 La Comunidad de Regantes V del Canal de Bardenas.....	47
3.3 Material y métodos.....	52
3.3.1 Estudio de los suelos .....	52
3.3.2 Evaluación del riego a escala de parcela .....	53
3.3.3 Evaluación del riego a escala de comunidad.....	56
3.3.3.1 Aproximación basada en la simulación .....	56
3.3.3.2 Aproximación hidrológica .....	58
3.4 Resultados y discusión.....	59
3.4.1 Estudio de los suelos .....	59
3.4.2 Evaluación del riego a escala de parcela .....	62
3.4.3 Evaluación del riego a escala de comunidad.....	67
3.4.3.1 Aproximación basada en la simulación .....	67
3.4.3.2 Aproximación hidrológica .....	74
3.5 Conclusiones .....	75
3.6 Referencias .....	77

### **4. ADOR-simulación, un modelo para la simulación de los flujos de agua en comunidades de regantes: descripción del modelo..... 81**

4.1 Introducción .....	83
4.2 Descripción del modelo.....	86
4.2.1 ADORsuperficie: módulo de simulación de riego por superficie	89
4.2.2 ADORcultivos: módulo de simulación de cultivos.....	91
4.2.3 ADORhidrosalino: módulo de simulación hidrosalino.....	95
4.2.4 ADORred: módulo de simulación de infraestructuras de riego.	97
4.2.5 ADORdecisión: módulo de simulación de toma de decisiones en la distribución de agua .....	98
4.2.6 Implementación informática del modelo.....	101

4.3 Ejemplo de aplicación.....	103
4.4 Conclusiones.....	110
4.5 Referencias.....	111
<b>5. ADOR-simulación, un modelo para la simulación de los flujos de agua en comunidades de regantes: aplicación del modelo .....</b>	<b>115</b>
5.1 Introducción.....	117
5.2 Caracterización del periodo de estudio.....	120
5.3 Planteamiento de las simulaciones con ADOR-simulación.....	121
5.4 Calibración y validación del modelo.....	127
5.5 El uso del agua en la CRV durante los años 2000 y 2001.....	134
5.6 Escenarios de mejora del uso del agua en la CRV.....	140
5.7 Influencia de la precisión de la estimación de la evapotranspiración de referencia en la simulación.....	148
5.8 Conclusiones.....	150
5.9 Referencias.....	152
<b>6. Conclusiones generales.....</b>	<b>155</b>
6.1 Conclusiones generales.....	157
<b>7. Recomendaciones para la investigación futura .....</b>	<b>161</b>
7.1 Recomendaciones para la investigación futura.....	163
<b>Índice Alfabético .....</b>	<b>165</b>



# Índice de Tablas

---

<b>Tabla 2.1</b> Variables meteorológicas medidas, altura y modelo del sensor usado en las estaciones de Zaragoza y Córdoba .....	19
<b>Tabla 2.2</b> Condiciones meteorológicas (temperatura del aire máxima y mínima y velocidad del viento) durante el periodo de medidas en Zaragoza y Córdoba.....	26
<b>Tabla 2.3</b> Parámetros del modelo de Katerji y Perrier, ecuación [2.4], obtenidos por regresión en Zaragoza y Córdoba para el periodo de calibración: a) usando estimaciones de $r_c$ de 24 horas; b) usando estimas horarias de $r_c$ . N, tamaño muestral; $R^2$ , coeficiente de determinación; $c_0$ , ordenada en el origen; $c_1$ , pendiente de la regresión.....	30
<b>Tabla 3.1</b> Resultados del muestreo de los suelos de la CRV (10 perfiles en suelos aluviales y 40 en suelos de plataformas) .....	60
<b>Tabla 3.2</b> Resultados de las evaluaciones de riego realizadas en la CRV .....	63
<b>Tabla 3.3</b> Valores medios y extremos de las eficiencias (de aplicación en el Escenario 1 y potencial de aplicación en el resto) y tiempos de riego de los distintos "turnos" de la CRV para los escenarios simulados considerando distintas dosis requeridas en plataformas ( $zr_{\text{plataf.}}$ ) y en aluviales ( $zr_{\text{aluv.}}$ ) .....	71

<b>Tabla 3.4</b> Índices de aprovechamiento (IAp) de la CRV calculados como la relación entre las necesidades hídricas netas de los cultivos (NHn) y el agua facturada por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) para las campañas de riego de 2000 y 2001 .....	75
<b>Tabla 4.1</b> Algunos índices de evaluación de los dos escenarios simulados con ADOR-simulación.....	109
<b>Tabla 5.1</b> Superficies de cultivo (ha) por sectores en la CRV durante las campañas de riego de 2000 y 2001.....	121
<b>Tabla 5.2</b> Resumen de los resultados obtenidos en la simulación con ADOR-simulación de la situación actual de la CRV durante los años 2000 y 2001, y de los diferentes escenarios de mejora.....	134

# Índice de Figuras

---

**Figura 2.1** Localización de las áreas de estudio .....18

**Figura 2.2** Regresión lineal simple ( $y = b_0 + b_1 x$ ) y estadísticas de análisis de error de la comparación entre valores medidos (variable dependiente  $y$ ) y estimados (variable independiente  $x$ ) de los valores diarios de  $ET_0$  en dos localidades, Zaragoza y Córdoba, para todo el periodo de medida. Las estimas se obtuvieron usando la ecuación de Penman-Monteith con un valor fijo de  $r_c$  ( $70 \text{ s m}^{-1}$ ), usando promedios diarios de las variables meteorológicas ( $ET_{24F}$ ) o sumando las estimas horarias ( $ET_{sumF}$ ).  $R^2$ , coeficiente de determinación ( $^0/1$ );  $b_0$ , ordenada en el origen ( $\text{mm d}^{-1}$ );  $b_1$ , pendiente de la regresión (adimensional); RMSE, raíz cuadrada del error cuadrático medio ( $\text{mm día}^{-1}$ ); MSEs, error cuadrático medio sistemático (%); IA, índice de similitud ( $^0/1$ );  $N$ , tamaño de la muestra. <sup>(a)</sup>  $b_0$  es significativamente diferente de 0; <sup>(b)</sup>  $b_0$  no es significativamente diferente de 0; <sup>(c)</sup>  $b_1$  es significativamente diferente de 1; <sup>(d)</sup>  $b_1$  no es significativamente diferente de 1 ( $\alpha = 0,95$ ) .....28

**Figura 2.3** Regresión lineal simple ( $y = b_0 + b_1 x$ ) y estadísticas del análisis de errores de la comparación entre valores medidos (variable dependiente  $y$ ) y estimados (variable independiente  $x$ ) de valores diarios de  $ET_0$  en Zaragoza para el grupo de datos de validación. Las estimas se obtuvieron usando la ecuación de Penman-Monteith con: a) un valor fijo de  $r_c$ , usando promedios de 24 horas de las variables meteorológicas ( $ET_{24F}$ ) o sumando las estimas horarias ( $ET_{sumF}$ ); b) valores variables de  $r_c$  (modelo de

Katerji y Perrier), usando promedios de 24 horas de las variables meteorológicas ( $ET_{24KP}$ ) o sumando las estimas horarias ( $ET_{sumKP}$ ); y c) valores de  $r_c$  variables (modelo de Todorovic), usando promedios de 24 horas de las variables meteorológicas ( $ET_{24T}$ ) o sumando las estimas horarias ( $ET_{sumT}$ ).  $R^2$ , coeficiente de determinación;  $b_0$ , ordenada en el origen;  $b_1$ , pendiente de la regresión; RMSE, raíz cuadrada del error cuadrático medio ( $mm\ día^{-1}$ ); MSEs, error cuadrático medio sistemático (%); IA, índice de similitud ( $0/1$ ); N, tamaño de la muestra. <sup>(a)</sup>  $b_0$  es significativamente diferente de 0; <sup>(b)</sup>  $b_0$  no es significativamente diferente de 0; <sup>(c)</sup>  $b_1$  es significativamente diferente de 1; <sup>(d)</sup>  $b_1$  no es significativamente diferente de 1 ( $\alpha = 0,95$ ) ..... 32

**Figura 2.4** Regresión lineal simple ( $y = b_0 + b_1 x$ ) y estadísticas del análisis de errores de la comparación entre valores medidos (variable dependiente y) y estimados (variable independiente x) de valores diarios de  $ET_0$  en Córdoba para el grupo de datos de validación. Las estimas se obtuvieron usando la ecuación de Penman-Monteith con: a) un valor fijo de  $r_c$ , usando promedios de 24 horas de las variables meteorológicas ( $ET_{24F}$ ) o sumando las estimas horarias ( $ET_{sumF}$ ); b) valores variables de  $r_c$  (modelo de Katerji y Perrier), usando promedios de 24 horas de las variables meteorológicas ( $ET_{24KP}$ ) o sumando las estimas horarias ( $ET_{sumKP}$ ); y c) valores de  $r_c$  variables (modelo de Todorovic), usando promedios de 24 horas de las variables meteorológicas ( $ET_{24T}$ ) o sumando las estimas horarias ( $ET_{sumT}$ ).  $R^2$ , coeficiente de determinación;  $b_0$ , ordenada en el origen;  $b_1$ , pendiente de la regresión; RMSE, raíz cuadrada del error cuadrático medio ( $mm\ día^{-1}$ ); MSEs, error cuadrático medio sistemático (%); IA, índice de similitud ( $0/1$ ); N, tamaño de la muestra. <sup>(a)</sup>  $b_0$  es significativamente diferente de 0; <sup>(b)</sup>  $b_0$  no es significativamente diferente de 0; <sup>(c)</sup>  $b_1$  es significativamente diferente de 1; <sup>(d)</sup>  $b_1$  no es significativamente diferente de 1 ( $\alpha = 0,95$ ) ..... 34

**Figura 2.5** Valores medios horarios de la resistencia de la cubierta vegetal estimados en Zaragoza y Córdoba usando los modelos de Katerji y Perrier ( $r_{cKP}$ ) y de Todorovic ( $r_{cT}$ ) para el periodo de validación ..... 37

**Figura 3.1** Localización y emplazamiento de la Comunidad de Regantes V del Canal de Bardenas (CRV) ..... 47

<b>Figura 3.2</b>	Localización y capacidad de retención de agua disponible de los perfiles de suelo estudiados en la CRV sobre una adaptación del mapa geomorfológico de la zona elaborado por Basso (1994) a escala 1:25.000 .....	49
<b>Figura 3.3</b>	Localización y eficiencia de aplicación de las evaluaciones de riego realizadas en la CRV sobre una adaptación del mapa geomorfológico de la zona elaborado por Basso (1994) a escala 1:25.000 .....	54
<b>Figura 3.4</b>	Perfil de los suelos de plataformas de la CRV con costra caliza escasamente cementada (izquierda) y fuertemente cementada formado un horizonte petrocálcico (derecha) .....	60
<b>Figura 3.5</b>	Funciones de infiltración obtenidas en tablares sobre suelos aluviales y de plataformas, y en surcos sobre suelos de plataformas de la CRV.....	66
<b>Figura 3.6</b>	Eficiencias de aplicación y tiempos de riego medios en los suelos de plataformas en función de la dosis de agua requerida para los tres escenarios simulados en la CRV .....	69
<b>Figura 3.7</b>	Mapa de eficiencias de aplicación en parcela en la CRV para la situación actual (Escenario 1), considerando una dosis requerida en plataformas de 65 mm .....	72
<b>Figura 3.8</b>	Mapa de eficiencias potenciales de aplicación en parcela en la CRV para el Escenario 2 (optimización del tiempo de corte), considerando una dosis requerida en plataformas de 65 mm .....	73
<b>Figura 4.1</b>	Descripción esquemática del modelo ADOR-simulación.....	87
<b>Figura 4.2</b>	Diagrama de objetos simplificado de ADOR-simulación .....	102
<b>Figura 4.3</b>	Representación esquemática de la comunidad de regantes y matrices de jerarquía de sus redes hidráulicas .....	104
<b>Figura 4.4</b>	Evolución del agotamiento de agua en el suelo y del nivel de agotamiento permisible para el cultivo de maíz de la parcela número 1. a) Media del 25 % de los puntos de simulación más secos; b) Media de todos los puntos de simulación .....	106

<b>Figura 4.5</b>	Dosis de agua infiltrada y niveles de agotamiento actual y permisible en el evento de riego producido el día 15 de junio en la parcela número 1 .....	107
<b>Figura 4.6</b>	Evolución en el tiempo de a) los caudales de la acequia número 1 (entrada de la balsa) y de salida de la balsa de regulación, y b) del nivel de agua almacenada en la misma. El periodo de tiempo comprende del 11 al 16 de junio .....	108
<b>Figura 5.1</b>	“Turnos” de riego de la Comunidad de Regantes V del Canal de Bardenas (CRV) sobre una adaptación del mapa geomorfológico de la zona elaborado por Basso (1994) a escala 1:25.000 .....	123
<b>Figura 5.2</b>	Infraestructuras y Sectores de la CRV, y puntos de toma para las transferencias de agua entre desagües y acequias planteadas en el Escenario 2 .....	124
<b>Figura 5.3</b>	Evolución de las demandas de agua mensuales registradas (por la CHE y la CRV) y simuladas con ADOR-simulación en el Sector XIX de la CRV para los años 2000 y 2001.....	131
<b>Figura 5.4</b>	Evolución de las demandas de agua mensuales registradas (por la CHE y la CRV) y simuladas con ADOR-simulación en el conjunto de la CRV, excepto el Sector XIX, para los años 2000 y 2001 .....	133
<b>Figura 5.5</b>	Demandas de agua anuales registradas (por la CHE y la CRV) frente a las simuladas con ADOR-simulación para cada Sector de la CRV, excepto el Sector XIX, para los años 2000 y 2001 .....	133
<b>Figura 5.6</b>	Mapa de eficiencias de riego en la CRV para la situación actual en el año 2000 .....	136
<b>Figura 5.7</b>	Mapa de eficiencias de riego en la CRV para la situación actual en el año 2001.....	137
<b>Figura 5.8</b>	Mapa de reducciones de rendimiento de los cultivos en la CRV para la situación actual en el año 2000.....	138
<b>Figura 5.9</b>	Mapa de reducciones de rendimiento de los cultivos en la CRV para la situación actual en el año 2001.....	139

<b>Figura 5.10</b> Evolución de la demanda de agua, la $\overline{IE}$ (%), la $\overline{YR}$ (%), y la $ET_c$ ( $hm^3$ ) en función de la jornada de riego para el Escenario 1.....	143
<b>Figura 5.11</b> Mapa de eficiencias de riego en la CRV para el Escenario 2 (16 h) .....	145
<b>Figura 5.12</b> Mapa de reducciones de rendimiento de los cultivos en la CRV para el Escenario 2 (16 h) .....	146
<b>Figura 5.13</b> Evolución de la demanda de agua, la $\overline{IE}$ (%), la $\overline{YR}$ (%), y la $ET_c$ ( $hm^3$ ) en función de la variación en la estimación de la $ET_0$ respecto a la estimación original (1,00) para el año 2000 en la CRV .....	149



# Glosario de símbolos

---

<b>a</b>	parámetro del modelo de resistencia de cultivo de Todorovic
<b>a</b>	parámetros de la función de infiltración de Kostiaikov
<b>A</b>	área de una sección del fluido
<b>ADOR</b>	Apoyo a las Decisiones en la Organización de Regadíos
<b>AE</b>	eficiencia de aplicación
<b>b</b>	parámetro del modelo de resistencia de cultivo de Todorovic
<b>b<sub>0</sub></b>	ordenada en el origen
<b>b<sub>1</sub></b>	pendiente de la regresión
<b>c</b>	parámetro del modelo de resistencia de cultivo de Todorovic
<b>c<sub>0</sub></b>	parámetro del modelo lineal de resistencia de cultivo de Katerji y Perrier
<b>c<sub>1</sub></b>	parámetro del modelo lineal de resistencia de cultivo de Katerji y Perrier
<b>CE</b>	conductividad eléctrica
<b>CHE</b>	Confederación Hidrográfica del Ebro
<b>c<sub>p</sub></b>	calor específico del aire
<b>CRAD</b>	capacidad de retención de agua disponible en el suelo
<b>CRV</b>	Comunidad de Regantes V del Canal de Bardenas
<b>d</b>	altura del plano de cero desplazamiento
<b>dM/dt</b>	tasa de cambio de la masa de sales almacenada en la zona de raíces
<b>DR</b>	dosis de riego

<b>DU<sub>iq</sub></b>	uniformidad de distribución del cuarto más bajo
<b>e<sub>a</sub></b>	presión de vapor real
<b>e<sub>s</sub></b>	presión de saturación del vapor
<b>ET<sub>0</sub></b>	evapotranspiración de referencia
<b>ET<sub>24F</sub></b>	valor diario de la ET <sub>0</sub> calculado con la ecuación de Penman-Monteith, usando un valor fijo de r <sub>c</sub> (70 s m <sup>-1</sup> ) y promedios diarios de las variables meteorológicas
<b>ET<sub>24KP</sub></b>	valor diario de la ET <sub>0</sub> calculado con la ecuación de Penman-Monteith, usando valores variables de r <sub>c</sub> (modelo de Katerji y Perrier) y promedios diarios de las variables meteorológicas
<b>ET<sub>24T</sub></b>	valor diario de la ET <sub>0</sub> calculado con la ecuación de Penman-Monteith, usando valores variables de r <sub>c</sub> (modelo de Todorovic) y promedios diarios de las variables meteorológicas
<b>ET<sub>cr</sub></b>	evapotranspiración real del cultivo
<b>ET<sub>cr<sub>ij</sub></sub></b>	evapotranspiración real del cultivo en el punto de cálculo <i>i</i> en el día <i>j</i>
<b>ET<sub>sumF</sub></b>	valor diario de la ET <sub>0</sub> calculado con la ecuación de Penman-Monteith, usando un valor fijo de r <sub>c</sub> (70 s m <sup>-1</sup> ) y promedios horarios de las variables meteorológicas, sumando las estimas horarias
<b>ET<sub>sumKP</sub></b>	valor diario de la ET <sub>0</sub> calculado con la ecuación de Penman-Monteith, usando valores variables de r <sub>c</sub> (modelo de Katerji y Perrier) y promedios horarios de las variables meteorológicas, sumando las estimas horarias
<b>ET<sub>sumT</sub></b>	valor diario de la ET <sub>0</sub> calculado con la ecuación de Penman-Monteith, usando valores variables de r <sub>c</sub> (modelo de Todorovic) y promedios horarios de las variables meteorológicas, sumando las estimas horarias
<b>F</b>	número de Froude
<b>FAO</b>	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
<b>G</b>	flujo de calor del suelo
<b>g</b>	aceleración de la gravedad
<b>GSM</b>	<i>Global System for Mobile Communications</i>
<b>h</b>	calado del fluido
<b>h<sub>c</sub></b>	altura media del cultivo
<b>I</b>	tasa de infiltración
<b>IA</b>	índice de similitud
<b>IA<sub>p</sub></b>	índice de aprovechamiento del agua
<b>IE</b>	eficiencia de riego media en parcela
<b>K</b>	constante de von Karman
<b>k</b>	parámetro de la función de infiltración de Kostiakov
<b>ky<sub>f</sub></b>	factor de respuesta de Stewart para la fase de crecimiento <i>f</i>
<b>M<sub>diw</sub></b>	masa de sales en el agua de riego

<b>M<sub>dp</sub></b>	masa de sales en el agua de percolación profunda
<b>M<sub>fsw</sub></b>	masa de sales en el agua final que permanece en el suelo
<b>M<sub>gsp</sub></b>	masa de yeso disuelta realmente en el agua del suelo
<b>M<sub>isw</sub></b>	masa de sales en el agua inicial del suelo
<b>M<sub>p</sub></b>	masa de sales en la precipitación
<b>M<sub>sd</sub></b>	masa de sales disuelta
<b>MSEs</b>	error cuadrático medio sistemático
<b>M<sub>sirf</sub></b>	masa de sales en las aguas de retorno
<b>M<sub>sp</sub></b>	masa de sales precipitada
<b>N</b>	tamaño de la muestra
<b>n</b>	rugosidad de Manning
<b>NAP</b>	nivel de agotamiento permisible de agua en el suelo
<b>NAP<sub>ij</sub></b>	nivel de agotamiento permisible en el punto de cálculo <i>i</i> para el día <i>j</i>
<b>nh</b>	número de horizontes del perfil del suelo hasta una profundidad de 1,20 m o hasta encontrar una capa limitante
<b>NHn</b>	necesidades hídricas netas de los cultivos
<b>P</b>	precipitación
<b>p</b>	fracción de agotamiento permisible según el cultivo y su evapotranspiración
<b>PAE</b>	eficiencia potencial de aplicación
<b>p<sub>i</sub></b>	contenido volumétrico de elementos gruesos del suelo en el horizonte <i>i</i>
<b>PNE</b>	probabilidad de no excedencia
<b>PP</b>	percolación profunda
<b>Q</b>	caudal unitario
<b>r*</b>	resistencia crítica
<b>R<sup>2</sup></b>	coeficiente de determinación
<b>r<sub>a</sub></b>	resistencia aerodinámica
<b>r<sub>aKP</sub></b>	resistencia aerodinámica en el modelo de Kateji y Perrier
<b>r<sub>c</sub></b>	resistencia de la cubierta vegetal
<b>r<sub>i</sub></b>	resistencia climatológica del modelo de Todorovic
<b>RMSE</b>	raíz cuadrada del error cuadrático medio
<b>R<sub>n</sub></b>	radiación neta
<b>S<sub>0</sub></b>	pendiente del campo
<b>S<sub>f</sub></b>	pendiente de fricción
<b>SIG</b>	Sistemas de Información Geográfica
<b>SIMIS</b>	<i>Scheme Irrigation Management Information System</i>

<b>t</b>	variable independiente tiempo
<b>U</b>	velocidad del viento
<b>x</b>	variable independiente
<b>x</b>	variable independiente espacio
<b>x<sub>i</sub></b>	<i>i</i> -ésimo valor estimado de $ET_0$
$\bar{x}$	media de los valores estimados
<b>y</b>	variable dependiente
<b>y<sub>i</sub></b>	<i>i</i> -ésimo valor observado de $ET_0$
<b>y<sub>i</sub></b>	rendimiento real del cultivo cosechado en el punto de cálculo <i>i</i>
<b>y<sup>^</sup><sub>i</sub></b>	<i>i</i> -ésimo valor predicho de $ET_0$ con el modelo de regresión lineal
<b>y<sub>max</sub></b>	rendimiento máximo del cultivo que puede obtenerse con un suministro hídrico óptimo
<b>YR</b>	reducción media del rendimiento de los cultivos
<b>Z</b>	infiltración acumulada
<b>z<sub>0m</sub></b>	longitud de rugosidad para el <i>momentum</i>
<b>z<sub>h</sub></b>	altura de medida de la temperatura
<b>z<sub>i</sub></b>	profundidad del horizonte <i>i</i> del suelo
<b>z<sub>m</sub></b>	altura de medida del viento
<b>z<sub>oh</sub></b>	altura de rugosidad para la transferencia de calor
<b>z<sub>r</sub></b>	dosis requerida
<b>z<sub>r aluv</sub></b>	dosis requerida en aluviales
<b>z<sub>r plataf</sub></b>	dosis requerida en plataformas
<b>Δ</b>	pendiente de la curva de la presión de saturación del vapor frente a la temperatura
<b>γ</b>	constante psicrométrica
<b>λ</b>	calor latente de vaporización
<b>λE</b>	flujo de calor latente
<b>θ</b>	contenido de agua del suelo
<b>θ<sub>cci</sub></b>	contenido gravimétrico de agua en el horizonte <i>i</i> del suelo a capacidad de campo
<b>θ<sub>pmi</sub></b>	contenido gravimétrico de agua en el horizonte <i>i</i> del suelo en el punto de marchitez
<b>θ<sub>R</sub></b>	contenido de agua en el nuevo horizonte de suelo explorado por las raíces en su crecimiento diario
<b>ρ<sub>a</sub></b>	densidad del aire media a presión constante
<b>ρ<sub>b i</sub></b>	densidad aparente del suelo en el horizonte <i>i</i>
<b>ρ<sub>w</sub></b>	densidad del agua
<b>τ</b>	tiempo de oportunidad

# Documento de Síntesis

---

El agua, como recurso natural esencial para la vida, debe gestionarse bajo unos principios que garanticen la sostenibilidad de sus aprovechamientos actuales y futuros. La agricultura es la actividad cuantitativamente más importante en cuanto a uso de los recursos hídricos, generando el 62 % de las demandas mundiales de agua. En España, y en el valle del Ebro, las demandas de origen agrario superan el 68 % del total.

La agricultura de regadío desempeña una función fundamental en la producción de alimentos en una gran parte del mundo. Además, presenta una serie de externalidades que repercuten positivamente en el ámbito social y económico de sus áreas de influencia. Sin embargo, como cualquier actividad humana, el regadío también puede producir impactos ambientales negativos, como la contaminación de las aguas o la sobreexplotación de los recursos hídricos, entre otros. Además, el uso agrario del agua puede entrar en conflicto con otros usos, como los medioambientales o los urbanos, generando una gran polémica social, como viene ocurriendo en Aragón desde hace ya varios años.

En el año 2000, la Unión Europea se dotó de un marco legal con el que afrontar al desafío que supone la mejora de los ecosistemas hídricos europeos. La aprobación de la Directiva Marco del Agua 2000/60/CE (DMA) pretende garantizar la satisfacción de las necesidades racionales de agua, promoviendo un uso eficiente y sostenible de este recurso natural. Para conseguir estos objetivos, la Directiva establece los principios de recuperación de los costes de los servicios relacionados con el agua, y el de “quien contamina paga”, como procedimientos básicos en la gestión de los recursos hídricos.

Para el regadío español en general, y el aragonés en particular, la aplicación de estos principios puede suponer importantes cambios. Los mismos estarían motivados por un incremento de los precios del agua asociados a su demanda y a su contaminación. Todo ello, unido a la incertidumbre sobre el futuro de la Política Agraria Común, podría significar la desaparición de las zonas de regadío menos rentables, en las que predominan los cultivos extensivos y los bajos precios del agua, tal como indican diversos estudios. De llegar a producirse esta situación, supondría el abandono de la actividad agraria en una parte importante del territorio, y la consiguiente intensificación del proceso de despoblación del medio rural, incompatible con el necesario equilibrio territorial que preconiza la

Estrategia Española de Desarrollo Sostenible. En Aragón, este proceso puede resultar especialmente crítico, dados los problemas de desertización demográfica que sufre la Comunidad.

Ante esta perspectiva, la modernización de los regadíos supone una herramienta fundamental para lograr la sostenibilidad económica, social y medioambiental de buena parte de la agricultura de regadío. Dicha modernización debe afectar no sólo a las infraestructuras hidráulicas, sino también a la gestión del agua. El proceso para llevarla a cabo resulta difícil y complejo, dada la gran diversidad de factores que influyen en la misma. Precisamente por ello, se debe profundizar en el conocimiento del aprovechamiento de los recursos hídricos en la agricultura, tal como establece la estrategia de implantación de la DMA, generando información que apoye la toma de decisiones en este tipo de procesos.

La presente Tesis ha tenido por objetivo contribuir a este conocimiento, desarrollando un modelo de simulación de los flujos de agua que se producen en las zonas regables. Para ello, además del desarrollo propiamente dicho, ha sido necesario llevar a cabo una serie de estudios. Así, se ha evaluado la idoneidad de diversas metodologías para el cálculo de la evapotranspiración de referencia, necesaria para la determinación de la evapotranspiración de los cultivos. Además, se ha estudiado el regadío de una comunidad de regantes del Canal de Bardenas en Zaragoza. Sobre dicho regadío se han evaluado las capacidades del modelo en el planteamiento y el análisis de diversas alternativas para la modernización del mismo.

## **El cálculo de la evapotranspiración de referencia**

La evapotranspiración es un componente clave del ciclo hidrológico. Su cuantificación es necesaria para una adecuada gestión de los recursos hídricos. En particular, la correcta estimación de la evapotranspiración de los cultivos conduce a un ahorro de recursos económicos e hídricos en la planificación y la gestión de zonas regables.

La determinación de la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) forma parte del cálculo de la evapotranspiración de los cultivos. Una precisa estima de la  $ET_0$  resulta fundamental para poder aplicar de forma realista modelos como el desarrollado en esta Tesis, debido a las repercusiones que este proceso físico tiene sobre el funcionamiento de un sistema de riego.

En 1998 la FAO recomendó la aplicación de la ecuación de Penman-Monteith para el cálculo de la  $ET_0$ . Esta ecuación había sido previamente avalada por la comunidad científica internacional como consecuencia de los buenos resultados obtenidos de la comparación con otras ecuaciones. Sin embargo, estudios posteriores sugirieron que dicha ecuación puede producir subestimaciones en condiciones semiáridas y ventosas, con una elevada demanda evaporativa.

Ante esta incertidumbre, y la necesidad de contar con valores ajustados de  $ET_0$  para el desarrollo de la Tesis, se comprobó la precisión en la estima de la  $ET_0$  diaria, mediante la ecuación de Penman-Monteith, bajo las condiciones semiáridas del valle del Ebro y del Guadalquivir. Para ello se evaluó el uso de valores fijos ( $70 \text{ s m}^{-1}$ ) frente a valores variables de resistencia del cultivo ( $r_c$ ) en la aplicación de la ecuación de Penman-Monteith. Los valores variables de  $r_c$  se obtuvieron a partir de dos modelos, el de Katerji y Perrier, y el de Todorovic. El realizar este trabajo en dos valles de características similares, que además concentran casi la mitad del regadío nacional, contribuyó a garantizar la solidez de los resultados obtenidos.

Los resultados indicaron que el uso de un valor fijo de  $r_c$  tal como propone la metodología de la FAO, proporciona estimas suficientemente precisas de la  $ET_0$  diaria a partir de datos meteorológicos medios diarios. En el caso de estimar la  $ET_0$  diaria a partir de la suma de la  $ET_0$  horaria, el uso de una  $r_c$  variable calculada con el modelo de Todorovic puede producir ligeras mejoras en la estimación, aunque con un mayor esfuerzo en su determinación.

Atendiendo a estos resultados, en el desarrollo del modelo de simulación de flujos de agua, y en la evaluación del regadío del Canal de Bardenas, se aplicó la metodología de la FAO para el cálculo de la  $ET_0$  diaria a partir de datos meteorológicos medios diarios.

## **La evaluación del regadío de la Comunidad de Regantes V**

Una vez evaluada y determinada la metodología a seguir en el cálculo de la  $ET_0$  bajo las condiciones del valle del Ebro, se procedió al estudio del regadío de una comunidad de regantes del Canal de Bardenas. El objetivo de este trabajo fue doble. Por una parte, diagnosticar la situación actual de dicho regadío mediante su evaluación. Por otra, recopilar todos los datos sobre la zona regable que posteriormente se necesitarían para aplicar y evaluar las capacidades del modelo de simulación desarrollado.

Este trabajo se llevó a cabo en la Comunidad de Regantes V (CRV), con sede en Ejea de los Caballeros (Zaragoza). Esta comunidad es representativa de las grandes zonas regables que se transformaron a mediados del siglo XX en España. Cuenta con una superficie regable de 15.545 ha que se riegan por superficie, excepto 450 ha que se riegan por aspersión. Los cultivos que predominan son los extensivos, con el maíz y la alfalfa a la cabeza, aunque también existen cultivos de hortalizas, fundamentalmente tomate y pimiento, que llegan a ocupar hasta un 10 % de la superficie regable.

Durante el desarrollo de este trabajo, se llevó a cabo una intensa campaña de trabajo de campo. En la misma se estudiaron los suelos y se evaluó el riego por superficie de la comunidad a escala de parcela. Ello requirió la apertura de 50 calicatas para el análisis del suelo, y la realización de 50 evaluaciones de riego en otras tantas parcelas. Esta fase de la Tesis se prolongó a lo largo de dos años.

En la comunidad se distinguieron dos grandes unidades de suelos. Una unidad está formada por plataformas residuales (localmente llamadas “sasos”), cuyos suelos se caracterizan por su escasa profundidad, la presencia de una costra calcárea con un grado de cementación variable, texturas francas con elevado contenido en elementos gruesos, y unas buenas condiciones de drenaje que permiten unos niveles de salinidad bajos. Como consecuencia de estas características, su capacidad de retención de agua disponible (CRAD) es baja, en torno a 60 mm de media. Esta unidad ocupa 11.054 ha, lo que equivale a un 71,1 % de la superficie de la CRV. La segunda unidad comprende la superficie restante, 4.491 ha (28,9 %), y se corresponde con los fondos aluviales del río Riguel, que atraviesa la CRV de norte a sur, y sus barrancos. Sus suelos son profundos, con texturas franco arcillosas y con escasa presencia de elementos gruesos, apareciendo algún problema de salinidad en la parte más deprimida del valle del río. Debido a ello, su CRAD es más elevada, alcanzando valores medios de 182 mm.

Respecto a las evaluaciones de riego, los resultados obtenidos indicaron que la eficiencia de aplicación (AE) media en parcela es baja (49 %), debido a la predominantemente escasa profundidad de los suelos, la limitada capacidad de la red de distribución de agua, y al propio manejo del riego. La aplicación de caudales de riego medios de  $152 \text{ L s}^{-1}$  permite que el tiempo de riego medio sea moderado ( $2,8 \text{ h ha}^{-1}$ ). Sin embargo, se comprobó que dicho tiempo se puede reducir hasta  $1,7 \text{ h ha}^{-1}$ . De esta forma la AE podría alcanzar valores del 76 %. No obstante, esta importante reducción del tiempo de riego resulta complicada en la

práctica debido a la jornada de riego de 24 h, y a la estructura de la propiedad de la tierra. En cualquier caso, cuando el sistema opera con un cierto nivel de escasez de agua, las eficiencias se incrementan sin merma sensible del rendimiento de los cultivos, debido a un más preciso manejo del riego y una mayor reutilización de los retornos de riego en la propia comunidad.

## **El desarrollo del modelo de simulación**

A partir del conocimiento sobre las características y funcionamiento de un regadío, adquirido con el trabajo realizado en la Comunidad de Regantes V, y de la experiencia acumulada de otros estudios en otras zonas regables, se desarrolló el modelo de simulación objeto de la Tesis. La importancia de los modelos de simulación radica en que, incorporados a sistemas de apoyo a la toma de decisiones en la planificación y gestión de zonas regables, constituyen potentes herramientas para incrementar la productividad del regadío de forma sostenible.

La aplicación informática que se generó en esta fase de la Tesis se denominó ADOR-simulación, programándose íntegramente en el lenguaje C++. El objeto de la misma es simular los flujos de agua que se producen en una comunidad de regantes a lo largo de una campaña de riego. En su programación se combinó una serie de módulos cuyo funcionamiento integrado permite reproducir la interacción del agua de riego con las infraestructuras, la producción agraria y el medio natural, dentro de un sistema agrícola de regadío.

El objetivo del desarrollo de ADOR-simulación fue proporcionar una herramienta analítica capaz de evaluar diferentes escenarios de planificación o gestión en comunidades de regantes. La estructura del modelo se realizó de tal forma que permitiese conocer el impacto que puede provocar la modificación de las infraestructuras, los sistemas de riego, la gestión del agua, las prácticas culturales, o la alternativa de cultivos sobre la eficiencia en el uso del agua, la producción agraria y los retornos de riego. De esta manera, el modelo puede aplicarse en casos como el análisis de estrategias de gestión del agua ante un cambio en la alternativa de cultivos, o en situaciones de escasez de agua, al anticipar la respuesta productiva de los cultivos y la demanda de agua de riego. Los procesos de modernización de regadíos también pueden apoyarse en la capacidad del sistema de evaluar, en términos de producción y de conservación de agua, actuaciones sobre las infraestructuras y sistemas de riego.

Para ello, el modelo incorpora cinco módulos de simulación orientados a la distribución de agua en lámina libre y al riego por superficie. Estos módulos

reproducen el riego propiamente dicho, el crecimiento de los cultivos, el balance hidrosalino, el funcionamiento de las infraestructuras de riego, y la toma de decisiones en el reparto del agua entre los agricultores. La capacidad de interacción entre estos módulos para simular de forma conjunta el funcionamiento de una comunidad de regantes constituye la principal aportación del modelo.

### **La aplicación del modelo de simulación**

Una vez desarrollado el modelo de simulación, y tras la necesaria calibración y validación del mismo, se llevó a cabo su aplicación para comprobar en condiciones reales sus capacidades predictivas. Para ello se utilizaron los datos recopilados sobre la Comunidad de Regantes V durante los dos años de trabajo de campo.

La aplicación del modelo exploró escenarios de mejora de la gestión del agua y del incremento de la reutilización de los retornos de riego bajo la preferencia de los agricultores por mantener el riego por superficie. Los resultados obtenidos indicaron como, en la práctica, resulta difícil superar una eficiencia de riego en torno al 50 % mediante riego por superficie. Para alcanzar esta eficiencia en la situación actual, la mejora de la gestión del agua, así como el incremento de la reutilización de los retornos de riego, se han mostrado como actuaciones eficaces. De esta forma se conseguiría reducir la demanda de agua, los retornos de riego y la jornada de riego, con los consiguientes beneficios medioambientales y sociales.

En su aplicación en la CRV, ADOR-simulación ha mostrado cómo la escasa CRAD de la mayor parte de sus suelos requiere su transformación a riego a presión si se pretende incrementar sensiblemente la eficiencia de riego. Como se ha indicado, esta actuación, que supone una modernización integral de las infraestructuras hidráulicas de la comunidad, representa una mejora notable respecto a la situación actual.

Sin embargo, los resultados de la simulación muestran cómo la modernización del regadío también puede producir una serie de efectos habitualmente no asociados a este tipo de actuaciones. La modernización de una zona regable implica un incremento de los usos consuntivos del agua debido al mejor abastecimiento hídrico de los cultivos. La importancia de este incremento depende, entre otros factores, de la magnitud del aumento de la eficiencia de riego que se logre gracias a la modernización. Ello supone un ahorro de agua regulada al reducirse los retornos de riego, pero también una disminución de la

disponibilidad efectiva de recursos hídricos en la cuenca. En esta situación será necesario buscar fuentes alternativas de agua a los usos medioambientales, urbanos, agrícolas o industriales que actualmente aprovechan las aguas de retorno que fluyen por los ríos. Dicha fuente alternativa sería la propia agua regulada ahorrada a través de la modernización, lo que redundaría en una mejora notable de la calidad del agua de los ríos, y utilizada por tales usos. Estos efectos ponen de manifiesto la necesidad de llevar a cabo estudios detallados de las implicaciones hidrológicas que en una cuenca puede tener la modernización de los regadíos, así como las afecciones sobre el resto de usuarios del agua.

## **Conclusiones**

Esta Tesis ha aportado herramientas, así como una aproximación metodológica, para generar información que permita optimizar el apoyo a la toma de decisiones en los procesos de planificación y gestión del regadío, con el fin de contribuir a su sostenibilidad medioambiental, económica, y social. Las capacidades mostradas por el modelo de simulación desarrollado permiten su aplicación en los procesos de modernización de regadíos, la mejora de la gestión de las comunidades de regantes, el apoyo a la planificación agronómica e hidrológica en campañas con escasez de agua, o el uso por parte de la Administración para determinar los niveles exigibles de excelencia en la gestión del agua en la agricultura, entre otros.

Los resultados obtenidos en esta Tesis se ven avalados desde un doble ámbito. Científicamente, los cuatro capítulos desarrollados han sido publicados en forma de artículos en revistas científicas europeas y estadounidenses incluidas en las listas del SCI. Técnicamente, los resultados de la Tesis han sido utilizados en el análisis del conflicto social generado en Aragón en torno al recrecimiento del embalse de Yesa. El trabajo llevado a cabo en la zona regable del Canal de Bardenas, único por su naturaleza e intensidad, fue considerado por la Confederación Hidrográfica del Ebro en el estudio de alternativas al recrecimiento de Yesa que redactó dicho organismo, tal como se recoge en el capítulo bibliográfico del mismo.

Asimismo, los resultados de esta Tesis también están contribuyendo a la imprescindible mejora de la gestión del regadío del sistema de Riegos del Alto Aragón, dentro del proyecto ADOR de la Comunidad General de Riegos del Alto Aragón. Dicho sistema también se encuentra envuelto en otro conflicto social como consecuencia del proyecto de construcción del embalse de Biscarrués.

# Resumen

---

La mejora de la productividad del agua de riego resulta imprescindible para responder a la mayor demanda de alimentos derivada del incremento de la población mundial. Para conseguirlo es necesario modernizar los regadíos mediante actuaciones tanto en sus infraestructuras como en sus modos de gestión. Ello contribuirá además a la sostenibilidad económica, social y medioambiental de las zonas regables.

Tanto en la planificación como en la gestión del regadío el conocimiento preciso de la evapotranspiración de los cultivos resulta esencial. En el Capítulo 2 de esta Tesis se ha comprobado la precisión en la estima de la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) diaria mediante la ecuación de Penman-Monteith bajo las condiciones semiáridas del valle del Ebro y del Guadalquivir (España). Se ha evaluado el uso de valores fijos ( $70 \text{ s m}^{-1}$ ) frente a valores variables de resistencia del cultivo ( $r_c$ ). Los valores variables de  $r_c$  se obtuvieron a partir de dos modelos, el de Katerji y Perrier, y el de Todorovic. Los resultados obtenidos indicaron como el uso de un valor fijo de  $r_c$ , tal como propone la metodología de la FAO, proporciona estimas suficientemente precisas de la  $ET_0$  diaria a partir de datos meteorológicos medios diarios. En el caso de estimar la  $ET_0$  diaria a partir de la suma de la  $ET_0$  horaria, el uso de una  $r_c$  variable calculada con el modelo de Todorovic produce ligeras mejoras en la estimación.

Así pues, la metodología de la FAO para el cálculo de la  $ET_0$  diaria a partir de datos meteorológicos medios diarios se utilizó en la evaluación del regadío de la Comunidad de Regantes V (CRV) del Canal de Bardenas, situada en el valle del Ebro (Capítulo 3). El diagnóstico de la situación actual de una zona regable constituye el paso previo a su modernización. Para ello se llevó a cabo una intensa campaña de campo para la evaluación de riegos y el muestreo de suelos. Los resultados obtenidos indicaron que la eficiencia de aplicación (AE) media es baja (49 %), debido a la predominantemente escasa profundidad de los suelos, la limitada capacidad de la red de distribución de agua y al propio manejo del riego. La aplicación de caudales de riego de  $152 \text{ L s}^{-1}$  permite que el tiempo de riego medio sea moderado ( $2,8 \text{ h ha}^{-1}$ ). Sin embargo, gracias a la aplicación de un modelo hidrodinámico de simulación de riego por superficie, se comprobó que dicho tiempo se puede reducir hasta  $1,7 \text{ h ha}^{-1}$ . De esta forma la AE podría alcanzar valores del 76 %. No obstante, esta importante reducción del tiempo de riego resulta complicada en la práctica debido a la jornada de riego de 24 h y a la

estructura de la propiedad de la tierra. A pesar de ello, se comprobó como la eficiencia del conjunto de la comunidad puede llegar a alcanzar un 66 % cuando el sistema opera con escasez de agua, debido a un más preciso manejo del riego y una mayor reutilización de los retornos de riego.

El uso de un modelo de simulación de riego por superficie supuso una gran ayuda en la evaluación del regadío de la CRV. Sin embargo, la aplicación de un modelo que reproduzca el funcionamiento de una comunidad de regantes en su conjunto permitiría obtener una visión del funcionamiento del regadío más próximo a la realidad. Con dicho modelo se facilitaría información básica para apoyar la toma de decisiones en la gestión y modernización del regadío. En el Capítulo 4 se presenta un modelo para la simulación de flujos de agua en comunidades de regantes denominado ADOR-simulación. El mismo se basa en la combinación de cinco módulos que permiten reproducir el riego por superficie, la distribución de agua, el crecimiento de los cultivos, el balance hidrosalino, y la toma de decisiones de riego y de reparto del agua entre las parcelas de una comunidad de regantes. Estos módulos se ejecutan en paralelo, estando conectados por una serie de variables de uso común.

En el Capítulo 5 se lleva a cabo la calibración, validación y aplicación del modelo en la CRV para los años 2000 y 2001. La calibración se realizó en uno de los once sectores hidrológicos de la CRV. La única variable de control fue la demanda mensual de agua debido a la escasez de datos disponibles. La diferencia anual entre la demanda observada y simulada en los años 2000 y 2001 fue del 0,9 y del 1,9 % respectivamente. Las variables de calibración sobre las que se actuó estaban relacionadas con el manejo y programación del riego. La validación se llevó a cabo en el resto de sectores de la CRV, obteniéndose una línea de regresión entre demanda mensual observada vs. simulada no significativamente diferente de la línea 1:1 en ambos años ( $\alpha = 0,95$ ). La aplicación del modelo exploró escenarios de mejora de la gestión del riego y del incremento de la reutilización de los retornos de riego bajo la preferencia de los agricultores por mantener el riego por superficie. Para el año 2000, los resultados mostraron que con estas mejoras se podrían haber reducido la demanda de agua y los retornos de riego en un 35,8 % y un 43,1 %, respectivamente, mientras que la jornada de riego se podría haber reducido a 16 h frente a las 24 h actuales. No obstante, las características de los suelos de la CRV hacen más recomendable su transformación a riego a presión. En cualquier caso, la modernización del regadío de la comunidad podría implicar una fuerte modificación del balance hidrológico con una disminución de la disponibilidad de agua en la cuenca.

# Abstract

---

Improvement of the irrigation water productivity is essential to satisfy the higher food demand derived of the increment of world population. To achieve these objectives, modernization of irrigated districts must be pursued through actions on both hydraulic infrastructures and water management. Likewise, this improvement will contribute to the economical, social and environmental sustainability of irrigated areas.

Irrigation planning and management needs accurate crop evapotranspiration estimates. In Chapter 2, the accuracy of the FAO Penman-Monteith equation to estimate daily reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) under the semiarid conditions of Ebro and Guadalquivir Valleys (Spain) has been verified. The performance of the method using fixed ( $70 \text{ s m}^{-1}$ ) versus variable canopy resistance ( $r_c$ ) was evaluated. Variable  $r_c$  values were computed with two models, that of Katerji and Perrier, and that of Todorovic. Results showed that the use of fixed  $r_c$  values, as proposed by FAO, provide sufficiently accurate daily  $ET_0$  estimates computed from 24 h meteorological averages. If daily  $ET_0$  estimates are obtained as the sum of hourly  $ET_0$  values, the use of variable  $r_c$  values calculated with the Todorovic model slightly but significantly improved the estimates.

The FAO Penman-Monteith method was used to compute daily  $ET_0$  from 24 h meteorological averages in the irrigation evaluations performed at the Irrigation District V (IDV) of the Bardenas Canal, located in the Ebro Valley (Chapter 3). The diagnostic of the current situation of an irrigated area must be the first step in its modernization process. Then, an intensive field work campaign was performed for irrigation evaluation and soil survey. Results showed a low average application efficiency (AE) (49 %), because shallow soils are predominant, capacity of the conveyance network is limited, and irrigation management practices are poor. The use of average irrigation discharge of  $152 \text{ L s}^{-1}$  allows a relatively low irrigation time ( $2.8 \text{ h ha}^{-1}$ ). Nevertheless, the application of a hydrodynamic surface irrigation model showed that this time could be reduced to  $1.7 \text{ h ha}^{-1}$  and subsequently the average AE could increase up to 76 %. However, this important reduction of the irrigation time would be difficult to implement in practice due to a daily irrigation journey of 24 h and the land ownership structure. Despite that, it was obtained that the overall district irrigation efficiency can reach a value of 66 %

when the system operates under water scarcity, due to a more accurate irrigation management and a greater reuse of water return.

The use of a surface irrigation model was very helpful for the irrigation evaluation of the IDV. However, the use of a model capable of reproducing the performance of a whole irrigation district would lead to more actual estimates. This model would provide basic information to assist decision makers in the irrigation modernization and management. In Chapter 4, a model for the simulation of water flows in irrigation districts, named ADOR-simulation, is presented. The model is based on the combination of five modules that reproduce: 1) surface irrigation; 2) open channel distribution networks; 3) crop growth modeling; 4) hydrosaline balances, and 5) irrigation decision making and water distribution between irrigation district fields. These modules are executed in parallel and are connected by a series of variables of common use.

In Chapter 5, calibration, validation and application of the model in the IDV for years 2000 and 2001 was carried out. Model calibration was performed in one of the eleven hydrological sectors of the IDV. Due to scarcity of data, a single control variable, the monthly water demand, was used. Seasonal differences between observed and simulated water demand amounted to 0.9 and 1.9 % for 2000 and 2001, respectively. The calibration variables were related to irrigation operation and scheduling. Model validation was performed in the rest of the sectors, and the regression line of observed vs. simulated monthly water demand was not significantly different than 1:1 line in both years ( $\alpha = 0.95$ ). Model application explored scenarios based on irrigation management improvement and increasing drainage water reuse for irrigation, under the farmers preference for keeping up the surface irrigation system. For 2000, these improvements showed that reductions of 35.8 % in the water demand and of 35.8 % in irrigation water returns could have been achieved, while daily irrigation journey could have been decreased from 24 to 16 hours. Nevertheless, district soil characteristics makes transformation to pressure irrigation more advisable. In any case, the irrigation modernization of the IDV would imply a severe modification of the hydrological balance in the district and therefore a decreased water availability at the watershed.

# Resum

---

La millora de la productivitat de l'aigua de reg resulta imprescindible per a respondre a la major demanda d'aliments donada per l'increment de la població mundial. Per aconseguir-lo es necessari modernitzar els regadius mitjançant actuacions tant a nivell d'infraestructures com a nivell de la seva gestió. Tantmateix, contribuirà a la sostenibilitat econòmica, social i medioambiental de les zones regables.

Tant en la planificació com en la gestió del regadiu, el coneixement precís de l'evapotranspiració dels conreus resulta essencial. En el Capítol 2 d'aquesta Tesi s'ha comprovat la precisió en l'estima de l'evapotranspiració de referència ( $ET_0$ ) diària mitjançant l'equació de Penman-Monteith sota les condicions semiàrides de la Vall de l'Ebre i del Guadalquivir (Espanya). S'ha avaluat l'ús de valors fixos ( $70 \text{ s m}^{-1}$ ) enfront a valors variables de resistència del conreu (cultiu) ( $r_c$ ). Els valors variables de  $r_c$  es van obtenir a partir de dos models, el de Katerji i Perrier, i el de Todorovic. Els resultats obtinguts indicaren com l'ús d'un valor fixe de  $r_c$ , tal i com proposa la metodologia de la FAO, proporciona estimacions prou (suficientment) precises de la  $ET_0$  diària a partir de les dades meteorològiques mitges diàries. En el cas d'estimar la  $ET_0$  diària a partir del sumatori de la  $ET_0$  horària, l'ús d'una  $r_c$  variable calculada amb el model de Todorovic dona lleugeres millores en l'estimació.

Per tant, la metodologia de la FAO per a calcular la  $ET_0$  diària, a partir de dades meteorològiques de les mitges diàries, fou empreta en l'avaluació del regadiu de la Comunitat de Regants V (CRV) del Canal de Bardenes, situada en la Vall d'Ebre (Capítol 3). Fer el diagnòstic de la situació actual d'una zona regable és el pas previ per a la seva modernització. Per això, es va dur a terme una intensa campanya de camp per a l'avaluació de recs i mostreig de sòls. Les dades obtingudes indicaren que l'eficiència d'aplicació (AE) mitja és baixa (49 %), degut a la predominantment escassa profunditat dels sòls, la limitada capacitat de la xarxa de distribució d'aigua i al propi maneig del reg. L'aplicació de caudals de reg de  $152 \text{ L s}^{-1}$  permeten que el temps de reg mig sigui moderat ( $2,8 \text{ h ha}^{-1}$ ). Però, gràcies a l'aplicació d'un model hidrodinàmic de simulació de reg per superfície, es va comprovar que aquest temps es pot reduir fins a  $1,7 \text{ h ha}^{-1}$ . Així, la AE podria assolir valors del 76 %. No obstant, aquesta important reducció de temps de reg resulta complicada de dur-la a la pràctica per la durada de la jornada de reg de

24 h i la pròpia estructura de la propietat de la terra. Malgrat tot, es va comprovar com l'eficiència del conjunt de la comunitat pot arribar a un 66% quan el sistema treballa amb dèficit d'aigua, degut a una major precisió en el mateig del reg i a una major reutilització dels retorns de reg.

L'ús d'un model de simulació de reg per superfície suposà un gran ajut en l'avaluació del regadiu de la CRV. Però, l'aplicació d'un model que reproduïx el funcionament d'una comunitat de regants en el seu conjunt permetria obtenir una visió del funcionament del regadiu més proper a la realitat. Amb l'esmentat model es facilitaria informació bàsica per a la presa de decisions en la gestió i modernització del regadiu. En el Capítol 4 es presenta un model per a la simulació de fluxes d'aigua en comunitats de regants denominat ADOR-simulació. Aquest model es basa en la combinació de cinc mòduls que permeten reproduir el reg per superfície, la distribució d'aigua, el creixement dels conreus (cultius), el balanç hidrosalí, y la presa de decisions de reg i de repartició de l'aigua entre les diferents parcel·les d'una comunitat de regants. Aquests mòduls s'executen en paral·lel, estan connectats per una sèrie de variable d'ús comú.

En el Capítol 5 es realitza la calibració, validació i aplicació del model en el CRV per als anys 2000 i 2001. La calibració es va fer en un dels onze sectors hidrològics de la CRV. La única variable de control fou la demanda mensual d'aigua degut a l'escassetat de dades disponibles. La diferència anual entre la demanda observada i simulada en els anys 2000 i 2001 va ser del 0,9 i del 1,9 % respectivament. Les variables de calibració respectes a les que es van actuar, estaven relacionades amb el maneig i programació del reg. La validació es va realitzar en el resta de sectors de la CRV, obtenint-se una línia de regressió entre demanda mensual observada vs. simulada no significativament diferent de la línia 1:1 en ambdós anys ( $\alpha = 0,95$ ). L'aplicació del model explorà escenaris de millora de la gestió del reg i de l'increment de la reutilització dels retorns de reg sota la preferència dels agricultors per mantenir el reg per superfície. Per al any 2000, els resultats mostraren que amb aquestes millores es podrien haver reduït la demanda d'aigua i els retorns de reg en un 35,8 % i un 43,1 %, respectivament, mentres que la jornada de reg es podria haver reduït a 16 h davant de les 24h actuals. No obstant, les característiques dels sòls de la CRV fan més recomendable la seva transformació a reg a pressió. En qualsevol cas, la modernització del regadiu de la comunitat podria implicar una forta modificació del balanç hidrològic amb una disminució de la disponibilitat d'aigua en la conca.





# INTRODUCCIÓN GENERAL

1

◀ **Salida del Canal de Bardenas** desde la presa de Yesa en el río Aragón (Navarra)

## 1.1 Introducción general

Durante las próximas décadas, el incremento de la población mundial va a generar unas mayores necesidades de producción de alimentos. Para lograrlo se requerirá, además de un incremento de la superficie cultivable y la mejora del rendimiento de los cultivos, una intensificación de los sistemas productivos (FAO, 2003).

La agricultura de regadío desempeña una función fundamental en la producción de alimentos de una gran parte del mundo, especialmente en aquellas zonas con mayores problemas de seguridad alimentaria. Se estima que el incremento de la superficie regable, así como la mejora de la productividad del agua de riego, pueden lograr dos terceras partes del incremento de la producción de alimentos que va a ser requerida en los próximos años (Marshall et al., 2002).

Según el sistema de información sobre el uso del agua en la agricultura (AQUASTAT) de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), en el año 2000 en el mundo existían más de 260 millones de hectáreas de superficie regable. Aproximadamente el 92 % de dicha superficie se riega mediante la técnica de riego por superficie. Dadas las necesidades de intensificación de la producción de alimentos citadas, se estima que en el período 2015-2030 cerca de 40 millones de hectáreas se transformarán en regadío, y más de 160 millones de hectáreas de regadíos actuales se modernizarán (FAO, 2003).

Esta modernización, además de lograr los objetivos antes citados, supondrá una serie de beneficios añadidos que contribuirán a lograr la sostenibilidad del regadío. En efecto, la mejora de la eficiencia de riego permitirá reducir los problemas de contaminación de aguas, así como de salinización de suelos en aquellas zonas más sensibles a este problema (Tanji y Keyes, 2002). De esta forma se contribuirá a la protección del medio ambiente y a la conservación de los recursos naturales, garantizando el uso sostenible del agua exigido tanto por gobiernos nacionales como por organismos internacionales (Vaux, 2002, Massaruto, 2003). Asimismo, se logrará la compatibilidad de la agricultura del regadío con otros usos del agua en creciente aumento de su demanda, como los medioambientales y urbanos (Bouwer, 2002).

En España, la aportación de la agricultura de regadío a la producción final agraria nacional es del 50 %, a pesar de que la superficie regada únicamente representa el 13 % (3.344.637 ha) de la superficie agraria útil (Forteza del Rey, 2002). Además, las zonas regables presentan una serie de externalidades que repercuten positivamente en el ámbito social y económico de sus áreas de influencia. La generación de actividades agroindustriales y de servicios, o la fijación de población en el medio rural, son algunos ejemplos (Comisión Europea, 2000).

En el regadío español la técnica del riego por superficie se encuentra presente en el 59 % de su superficie, teniendo el 71 % de estas zonas una antigüedad superior a 25 años (Navarro, 2002a). Esta situación supone que una buena parte de la superficie regable del país presenta un nivel tecnológico que no permite realizar un aprovechamiento óptimo del agua. Como consecuencia de ello la rentabilidad de las explotaciones agrarias se resiente, el impacto medioambiental del regadío se acentúa, y la calidad de vida de los agricultores no alcanza los niveles de los que se disfruta en otros sectores de actividad.

Estos datos, junto a los nuevos retos a los que ya se está enfrentando la agricultura del país, advierten de la comprometida situación en la que se encuentra este sector ante el futuro. En efecto, dada la progresiva liberalización del comercio mundial, la importancia económica que en las próximas décadas presenten la agricultura de regadío y sus externalidades estará en función de su capacidad para competir en los mercados globales. Y ello, en un contexto de reducción de las ayudas a la agricultura, y de creciente competencia por el agua con otros sectores económicos. De todo ello se deriva la perentoria necesidad de someter a los regadíos españoles a un proceso de modernización que, mediante el

incremento de su nivel tecnológico, asegure su sostenibilidad y la del sector agrario español en su conjunto.

Consciente de todo ello, el Gobierno español aprobó en 2002 un Plan Nacional de Regadíos en el que el 61 % de su presupuesto se destina a actuaciones de modernización de regadíos hasta el horizonte del año 2008 (Forteza del Rey, 2002). Dicho Plan se enmarca en el proceso de planificación hidrológica al que obliga la Ley de Aguas de 1985 para el correcto ordenamiento y administración de los recursos hídricos del país. De este modo, su redacción se llevó a cabo de forma coordinada con los Planes Hidrológicos de las Cuencas de los grandes ríos y el Plan Hidrológico Nacional.

Además de incrementar la superficie regable en más de 242.000 ha, su principal objetivo consiste en asegurar la sostenibilidad económica, social y medioambiental de la agricultura de regadío. Para ello, el Plan prevé someter a un proceso de modernización a más de 1.134.000 ha de regadío, cuya antigüedad y nivel tecnológico actual les impediría asumir con garantías de éxito los retos que ya se le están planteando a la agricultura nacional.

El valle del Ebro es un ejemplo de esta situación. Aunque existen zonas con regadíos relativamente modernos, un 80 % de su superficie regable –que comprende un total de 783.948 ha- utiliza la técnica del riego por superficie (Navarro, 2002b). La antigüedad de las grandes zonas regables del valle del Ebro es variable. Así, se encuentran zonas transformadas con anterioridad al siglo XX, como el Canal Imperial de Aragón (siglo XVIII) o el Canal de Urgell (siglo XIX), y zonas que se empezaron a ejecutar en la primera mitad del siglo XX (algunas de ellas todavía inconclusas) denominadas “Grandes Zonas Regables de Interés General del Estado”, como el Sistema de Riegos del Alto Aragón o el Canal de Bardenas (Bolea, 1986).

Estos regadíos se caracterizan por su gran parcelación, dada la distribución de la tierra que se realizó en la ejecución de estas “Grandes Zonas Regables” (De los Ríos, 1966; Faci et al., 2000; Playán et al. 2000). Esta parcelación dio lugar a la existencia de unos sistemas de distribución de agua muy ramificados. Asimismo, y debido a la intensificación de los cultivos desde finales del siglo XX, la distribución de agua es poco flexible (jornadas de riego de 24 h), y con capacidades de transporte inferiores a la demanda de agua de riego. Como consecuencia de todo ello, y del importante peso económico que la agricultura sigue teniendo en algunas de las provincias del valle (Forteza del Rey, 2002),

estas zonas regables constituyen un objetivo prioritario en el proceso de modernización emprendido en el país.

La modernización de una zona regable comprende, además de actuaciones sobre sus infraestructuras hidráulicas, una mejora de la gestión del agua de riego. Este último es un aspecto fundamental para conseguir incrementar la productividad del regadío de forma sostenible (Burt y Styles, 1999; Vidal et al., 2001).

En cualquier proceso de modernización se deben considerar multitud de factores técnicos, económicos, medioambientales y sociológicos, dada la complejidad de las zonas regables. Los modelos de simulación incorporados a sistemas de apoyo a la toma de decisiones en la planificación y gestión de zonas regables constituyen unas potentes herramientas en este sentido (Hall, 1999; Walker, 1999; Playán et al., 2000). Su combinación con Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite evaluar de manera ágil y rápida gran cantidad de alternativas de mejora tanto de las infraestructuras como de la gestión.

Durante las últimas décadas se han desarrollado diversos modelos matemáticos para la simulación del riego por superficie (Strelkoff, 1970; Walker y Skogerboe, 1987; Walker, 1993), del desarrollo de los cultivos (Williams et al., 1984; Smith, 1992; Stockle et al., 1994), o de los flujos de sales en áreas regables (Tanji, 1977; Quílez, 1999).

Asimismo, también se han desarrollado modelos que tratan de reproducir el funcionamiento de zonas regables en su conjunto. Una forma de conseguirlo ha sido mediante la aplicación de manera conjunta de diversos modelos de simulación que permitan analizar en detalle distintos escenarios de planificación y manejo (Merkley, 1994; Yamashita y Walker, 1994; Prajamwong et al., 1997; Mateos et al., 2002). Para ello estos sistemas estiman la demanda potencial de agua de una zona regable, así como su respuesta productiva, a partir de balances diarios de agua (y de sales según los casos) en las parcelas. Sin embargo, para realizar estos balances no se han encontrado trabajos en los que se reproduzca el riego en parcela.

Una correcta estima de la evapotranspiración de los cultivos es fundamental para poder aplicar de forma realista este tipo de modelos. Las repercusiones que este proceso físico tiene sobre el funcionamiento de un sistema de riego explican su relevancia. En 1998, la FAO, consciente de este hecho, editó

un nuevo manual para el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos (Allen et al., 1998). En esta publicación se redefine el concepto de evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) y se adopta el método de Penman-Monteith para su determinación. Esta metodología de cálculo había sido avalada previamente por la comunidad científica internacional, dados los buenos resultados obtenidos en distintas zonas del mundo en su comparación con otros métodos (Jensen et al., 1990; Smith et al., 1991; Allen et al., 1994).

Posteriores estudios han confirmado estos resultados, aunque en algunos casos se ha observado una subestimación de la  $ET_0$  en zonas semiáridas, con vientos moderados y con gran demanda evaporativa (Rana et al., 1994, Steduto et al., 1996, Todorovic, 1999, Ventura et al., 1999; Pereira et al., 1999).

Los trabajos realizados en esta Tesis han tenido por objeto desarrollar un modelo que permita simular los flujos de agua que se dan en una comunidad de regantes. De esta forma se podrá reproducir la interacción entre los distintos factores que influyen en el uso del agua, la producción agraria o el medio natural en un sistema agrícola de regadío. Para ello se han incorporado distintos módulos que permiten simular el crecimiento de los cultivos, la agregación de caudales en las redes hidráulicas, el balance hidrosalino, el riego por superficie, y la toma de decisiones en la distribución de agua.

El desarrollo de este modelo, denominado ADOR-simulación, tiene como objetivo contribuir al proceso de modernización y mejora de la gestión del regadío para asegurar su sostenibilidad económica, social y medioambiental. Para ello se aporta una herramienta analítica capaz de evaluar diferentes escenarios de planificación o gestión en una comunidad de regantes, de manera que sus resultados apoyen la toma de decisiones en estos ámbitos. La combinación de estos desarrollos con los realizados por Dechmi et al. (2004) en el ámbito de la simulación del riego por aspersión, permitirá aplicar el modelo en comunidades de regantes tanto de riego por superficie como de riego por aspersión.

ADOR-simulación se ha desarrollado dentro de un proyecto denominado *Apoyo a las Decisiones en la Organización de Regadíos* (ADOR). Este proyecto tiene por objetivo contribuir a la mejora del uso del agua de riego mediante el desarrollo de aplicaciones informáticas que faciliten la gestión del agua en las comunidades de regantes, aumenten su capacidad técnica, y permitan estimar las repercusiones económicas, medioambientales y sociales de la modernización de los regadíos.

Los objetivos parciales de esta Tesis han sido los siguientes:

- Evaluar si el uso de valores variables de resistencia de la cubierta vegetal contribuye a mejorar las estimas de  $ET_0$  -obtenidas aplicando la ecuación de Penman-Monteith- bajo condiciones semiáridas dónde la demanda evaporativa es alta (Capítulo 2).
- Realizar un diagnóstico de la situación actual de un regadío tradicional, como es el de la Comunidad de Regantes V del Canal de Bardenas (CRV), situada en el valle medio del Ebro (Capítulo 3).
- Evaluar diferentes alternativas de mejora de este regadío usando un modelo de riego en parcela, de manera que sirvan para apoyar la toma de decisiones en cuanto a su futura modernización (Capítulo 3).
- Desarrollar, calibrar y validar un modelo que permita simular los flujos de agua en comunidades de regantes (Capítulos 4 y 5).
- Evaluar las capacidades de dicho modelo en el ámbito técnico para apoyar la toma de decisiones en la planificación y gestión de una zona regable (Capítulo 5).
- Evaluar las capacidades de dicho modelo en el ámbito científico para determinar la influencia que la precisión en la estimación de la  $ET_0$  puede tener sobre el funcionamiento de una zona regable (Capítulo 5).

## 1.2 Referencias

Allen, R.G., Smith, M., Perrier, A., Pereira, L.S. 1994. An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bull.* 43(2), 1-34.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper nº 56. FAO. Roma (Italia). 300 pp.

Bolea, J.A. 1986. Los riegos de Aragón. Grupo Parlamentario Aragonés Regionalista de las Cortes de Aragón. Huesca (España). 579 pp.

Bouwer, H. 2002. Integrated water management for the 21st century: problems and solutions. *J. Irrig. Drain. Engrg., ASCE*, 128(4), 193-202.

Burt, C.M., Styles, S.W. 1999. Modern water control and management practices in irrigation. Impact on performance. FAO Water Reports No. 19. FAO. Roma (Italia). 223 pp.

Comisión Europea. 2000. La Agenda 2000. Fortalecer y ampliar la Unión Europea. Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas. Luxemburgo (Luxemburgo). 23 pp.

Dechmi, F., Playán, E., Cavero, J., Martínez-Cob, A., Faci, J.M. 2004. A coupled crop and solid set sprinkler simulation model: I. Model development. *J. Irrig. Drain. Engrg., ASCE* (en prensa).

De los Ríos, F. 1966. Colonización de las Bardenas, Cinco Villas, Somontano y Monegros. Institución "Fernando el Católico". Zaragoza (España). 56 pp.

Faci, J.M., Bensaci, A., Slatni, A., Playán, E. 2000. A case study for irrigation modernisation: I. Characterisation of the district and analysis of water delivery records. *Agric. Wat. Manage.*, 42,313-334.

FAO. 2003. World agriculture: towards 2015/2030. An FAO perspective. Ed. Jelle Bruinsma. FAO-Earthscan Publications Ltd. Londres (Reino Unido). 432 pp.

Forteza del Rey, V. 2002. El Plan Nacional de Regadíos. *Agricultura*, 842, 554-556.

Hall, A.W. 1999. Priorities for irrigated agriculture. *Agric. Wat. Manage.*, 40, 25-29.

Jensen, M.E., Burman, R.D., Allen, R.G. 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 70. American Society of Civil Engineers. Nueva York (EE.UU). 332 pp.

Marshall J.E., Kenneth, H.S., Glenn, J.H. 2002. A paradigm shift in irrigation management. *J. Irrig. Drain. Engrg.*, ASCE, 128(5), 267-277.

Massaruto, A. 2003. La demanda de agua de riego en Europa: el impacto de la Agenda 2000 y la Directiva Marco del Agua. En: Los instrumentos económicos en la gestión del agua en la agricultura. Ed. José Albiac Murillo. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid (España). pp. 65-82.

Mateos, L., López-Cortijo, I., Sagardoy, J.A. 2002. SIMIS: the FAO decision support system for irrigation scheme management. *Agric. Wat. Manage.*, 56, 193-206.

Merkley, G.P. 1994. Planning Distribution Model. A simulation tool for water management planning in large-scale irrigation and drainage networks. User's Guide. Biological and Irrigation Engineering Department, Utah State University. Logan (EE.UU.). 104 pp.

Navarro, M. 2002a. Situación de los regadíos existentes. Necesidad de un programa de consolidación y mejora. *Agricultura*, 842, 566-573.

Navarro, M. 2002b. Los nuevos regadíos en el Plan Nacional de Regadíos. *Agricultura*, 842, 574-577.

Pereira, L.S., Perrier, A., Allen, R.G., Alves, I. 1999. Evapotranspiration: concepts and future trends. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, 125(5), 235-245.

Playán, E., Slatni, A., Castillo, R., Faci, J.M. 2000. A case study for irrigation modernisation: II. Scenario Analysis. *Agric. Wat. Manage.*, 42, 335-354.

Prajamwong, S., Merkley, G.P., Allen, R.G. 1997. Decision support model for irrigation water management. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, 123(2), 106-113.

Quílez, D. 1999. La salinidad en las aguas superficiales de la Cuenca del Ebro: Análisis del impacto Potencial del regadío de Monegros II. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria. Universidad de Lleida. Lérida (España). 352 pp.

Rana, G., Katerji, N., Mastrorilli, M., El Moujabber, M. 1994. Evapotranspiration and canopy resistance of grass in a Mediterranean region. *Theor. Appl. Climatol.*, 50, 61-71.

Smith, M., Allen, R.G., Monteith, J.L., Perrier, A., Pereira, L.S., Seegeren, A. 1991. Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. FAO Land and Water Development Division. FAO. Roma (Italia). 45 pp.

Smith, M. 1992. CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management. FAO Irrig. and Drain. Paper n° 46. FAO. Roma (Italia). 126 pp.

Steduto, P., Caliendo, A., Rubino, P., Ben Mechlia, N., Masmoudi, M., Martínez-Cob, A., Faci, J.M., Rana, G., Mastrorilli, M., El Mourid, M., Karrou, M., Kanber, R., Kirda, C., El-Quosy, D., El-Askari, K., Ait Ali, M., Zareb, D., Snyder, R.L. 1996. Penman-Monteith reference evapotranspiration estimates in the mediterranean region. En: Camp C.R., Sadler, E.J., Yoder, R.E. (Eds). Proc. Int. Conf. On Evapotranspiration and Irrig. Scheduling, November 3-6 1996, en San Antonio, (EE.UU.). pp 357-364.

Stockle C.O., Martín S.A., Campbell G.S. 1994. CropSyst, a cropping systems simulation model: water/nitrogen budgets and crop yield. Agric. Syst. 46, 335-359.

Strelkoff, T. 1970. Numerical solution of the Saint-Venant equations. ASCE J. Hydr. Div., 96(HY1), 223-252.

Tanji, K.K. 1977. A conceptual hydrosalinity model for predicting salt load in irrigation return flows. Managing saline water for irrigation. Texas Tech. University. Lubbock (EE.UU.). 49-65.

Tanji, K.K., Keyes, C.G. 2002. Water quality aspects of irrigation and drainage: past history and future challenges for civil engineers. J. Irrig. and Drain. Engrg., 128(6), 332-340.

Todorovic, M. 1999. Single-layer evapotranspiration model with variable canopy resistance. J. Irrig. and Drain. Engrg., 125(5), 235-245.

Vaux, H. 2002. New realities for irrigated agriculture. California Agriculture. Jul-Aug 2002, pp. 114.

Ventura, F., Spano, D., Duce, P., Snyder, R.L. 1999. An evaluation of common evapotranspiration equations. Irrig. Sci., 18(4), 163-170.

Vidal, A., Comeau, A., Plusquellec, H., Gadelle, F. 2001. Case studies on water conservation in the mediterranean region. FAO. Roma (Italia). 52 pp.

Walker, S.H. 1999. More from less – better water management: issues and future policy. Agric. Wat. Manage., 40, 135-138.

Walker, W.R. 1993. SIRMOD, Surface irrigation simulation software. Utah State University. Logan (EE.UU.) 27 pp.

Walker, W.R.; Skogerboe, G.V. 1987. Surface irrigation. Theory and practice. Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs. New Jersey (EE.UU.). 386 pp.

Williams, J.R., Jones, C.A., Dyke, P.T. 1984. A modelling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. Trans. ASAE, 27, 129-144.

Yamashita, S., Walker, W.R. 1994. Command area water demands. Part I. Validation and calibration of UCA model. J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, 120(6), 1025-1042.



**VALORES VARIABLES DE LA RESISTENCIA  
DE LA CUBIERTA VEGETAL:  
EVALUACIÓN DE SU USO EN LA  
ECUACIÓN DE PENMAN-MONTEITH  
EN CONDICIONES SEMIÁRIDAS**

2

◀ **Estación agrometeorológica automática** instalada en la Comunidad de Regantes V

## 2.1 Introducción

La evapotranspiración es un componente clave del ciclo hidrológico. Su cuantificación es necesaria para una adecuada gestión de los recursos hídricos. En particular, la estimación precisa de la evapotranspiración de los cultivos conduce a un ahorro de recursos económicos e hídricos en la planificación y la gestión de zonas regables.

En 1977, la Organización para la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas (FAO) propuso una metodología para calcular la evapotranspiración basada en el uso de la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) y los coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) (Doorenbos y Pruitt, 1977). Esta metodología sigue siendo válida en la actualidad. En 1998, la FAO publicó un nuevo manual para el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos (Allen *et al.*, 1998), que redefinió el concepto de evapotranspiración de referencia y adoptó la ecuación de Penman-Monteith para su estimación, sustituyendo a la ecuación de Penman recomendada por Doorenbos y Pruitt (1977). Esta ecuación había sido previamente avalada por la comunidad científica internacional como consecuencia de los buenos resultados obtenidos de la comparación con otras ecuaciones en diferentes regiones del mundo (Allen *et al.*, 1989; Jensen *et al.*, 1990; Smith *et al.*, 1991, Allen *et al.*, 1994a, b).

Estudios posteriores mostraron que se obtenían menores diferencias entre los valores medidos de  $ET_0$  y los estimados con la ecuación de Penman-Monteith que con otras ecuaciones (Choisnel *et al.*, 1992; Hussein, 1999; Ventura *et al.*, 1999; Berengena *et al.*, 2001). En cualquier caso, muchos de estos estudios

sugieren que se produce una subestimación de la  $ET_0$  medida en las condiciones de zonas semiáridas y ventosas con una elevada demanda evaporativa, y una sobreestimación cuando la demanda evaporativa es baja. Esa subestimación varió entre un 2 y un 18 % (Rana et al., 1994; Steduto et al., 1996; Pereira et al., 1999; Todorovic, 1999; Ventura et al., 1999).

La resistencia de la cubierta vegetal ( $r_c$ ) es un factor principal en el proceso evapotranspirativo (Monteith, 1965). Esta resistencia no es sólo un parámetro fisiológico, sino que tiene además una componente aerodinámica. Así, depende de muchos factores, tales como las variables meteorológicas, el potencial del agua de la planta y la posición de las hojas en la planta (Perrier, 1975; Alves et al., 1998; Pereira et al., 1999; Alves y Pereira, 2000).

Smith et al. (1991) y Allen et al. (1994a, b) propusieron un valor constante de la resistencia de la cubierta vegetal de  $70 \text{ s m}^{-1}$  para calcular la evapotranspiración de referencia de hierba con la ecuación de Penman-Monteith. Esta hipótesis fue adoptada por la FAO (Allen et al., 1998) para obtener una ecuación estándar que pudiera ser aplicada en todo el mundo. Sin embargo, Rana et al. (1994), Steduto et al. (1996) y Ventura et al. (1999), entre otros, consideran que este valor fijo de  $r_c$  es una causa posible de la citada subestimación de la ecuación de Penman-Monteith.

La resistencia de la cubierta vegetal puede ser estimada a partir de la relación entre el valor de  $r_c$  calculado invirtiendo la ecuación de Penman-Monteith, y las variables meteorológicas, usando el modelo multiplicativo de Jarvis (1976). Sin embargo, este enfoque ha sido cuestionado porque las mismas variables consideradas en el modelo de Jarvis se usan para calcular  $r_c$  invirtiendo la ecuación de Penman-Monteith. Asimismo, este procedimiento sólo incluye la componente fisiológica de  $r_c$ , y no considera la componente aerodinámica (Alves y Pereira, 2000).

Katerji y Perrier (1983) propusieron otro enfoque usando un modelo lineal en el que  $r_c$  depende de variables climáticas y de la resistencia aerodinámica. Este modelo ha sido probado con buenos resultados, y varios autores lo han recomendado para aplicaciones prácticas (Rana et al., 1994; Pereira et al., 1999; Alves y Pereira, 2000; Rana y Katerji, 2000). Sin embargo, este modelo precisa calibración para obtener los valores de sus parámetros, y fue desarrollado para un rango limitado de valores de la relación de Bowen.

Recientemente, Todorovic (1999) desarrolló un modelo en el que  $r_c$  es también función de las variables climáticas y de la resistencia aerodinámica, pero que no requiere calibración y que puede ser aplicado para cualquier valor de la relación de Bowen. La aplicación de este modelo al cálculo de la  $ET_0$  con la ecuación de Penman-Monteith mostró un mejor ajuste a los valores medidos de  $ET_0$  que cuando se usó un valor fijo de  $r_c$  (Todorovic, 1999).

En este capítulo, la ecuación de Penman-Monteith con un valor fijo de  $r_c$  ( $70 \text{ s m}^{-1}$ , Allen et al., 1998) y con valores de  $r_c$  variables se usó para estimar valores diarios de  $ET_0$  en los valles del Ebro y Guadalquivir, en España. Aproximadamente un 42 % de la superficie regada española está situada en estos dos valles. Se obtuvieron estimas diarias de  $ET_0$  aplicando la ecuación de Penman-Monteith: directamente a valores medios diarios de las variables meteorológicas, o a valores horarios de las variables meteorológicas y sumando los resultados para obtener estimas diarias. Se obtuvieron valores variables de  $r_c$  aplicando los modelos de Katerji y Perrier (1983) y Todorovic (1999). Las estimas se compararon con valores medidos de  $ET_0$  usando un lisímetro de pesada (en el valle del Ebro) o un sistema de covarianza de torbellinos (en el valle del Guadalquivir). El objetivo principal fue evaluar si el uso de valores variables de  $r_c$  contribuía a mejorar las estimas de  $ET_0$  obtenidas aplicando la ecuación de Penman-Monteith bajo las condiciones semiáridas de los valles del Ebro y del Guadalquivir, donde la demanda evaporativa es alta, particularmente durante el verano.

## **2.2 Material y métodos**

### **2.2.1 Descripción de las zonas experimentales**

Este estudio se llevó a cabo en dos localidades representativas de los valles del Ebro y Guadalquivir, Zaragoza y Córdoba, respectivamente (Figura 2.1).

#### **2.2.1.1 El valle del Ebro**

En este caso, el estudio se llevó a cabo en una finca experimental situada en Zaragoza, en las terrazas del río Gállego, a unos 8 km al norte de su

desembocadura en el río Ebro. La elevación es de 225 m sobre el nivel del mar, la latitud es de 41° 43' N, y la longitud es de 0° 49' W (Greenwich). La precipitación media anual es de aproximadamente 330 mm, en su mayoría registrada durante la primavera y el otoño, aunque algunas precipitaciones tormentosas son relativamente frecuentes durante el verano. La temperatura media anual es de unos 15 °C. La zona está entre las más ventosas de España.



**Figura 2.1** Localización de las áreas de estudio

Las medidas se realizaron en una parcela de 1,2 ha (120 m x 100 m), que estaba uniformemente cubierta por un cultivo de festuca alta (*Festuca arundinacea* Moench.). Los suelos de la parcela se describen como *Typic Xerofluvent* (Soil Survey Staff, 1992). La parcela fue regada y cortada durante todo el año para mantenerla lo más próximo posible al estándar de referencia. El periodo de medidas duró desde marzo a octubre de 1999 y desde marzo a septiembre de 2000.

Un lisímetro de pesada, con una profundidad de 1,7 m y 6,3 m<sup>2</sup> de área efectiva, se construyó en el centro de la parcela. Una célula de carga conectada a un equipo acumulador de datos (Campbell Scientific CR500) registró la masa del lisímetro cada 0,5 s. Cada 30 min se promediaron estas masas. A partir de la variación entre dos masas horarias consecutivas se derivaron las tasas horarias de  $ET_0$ . Los valores diarios de  $ET_0$  medida se obtuvieron de la suma de los valores horarios. La resolución combinada de la célula de carga y del equipo acumulador de datos permitió detectar pérdidas de masa de unos 0,3 kg (0,05 mm de profundidad de agua). Sólo los días sin incidencias (riego, lluvia, drenaje del lisímetro y corte de la hierba) y en los que la altura de la festuca estuvo entre 0,10 y 0,15 m, se usaron para este estudio.

Una estación meteorológica automática (CR10 de Campbell Scientific) se instaló cerca del lisímetro. La estación registró valores horarios de la temperatura y la humedad relativa del aire, la radiación neta, el flujo de calor en el suelo, y la velocidad y dirección del viento. La Tabla 2.1 lista los modelos y fabricantes de los sensores usados, así como la altura de los mismos.

**Tabla 2.1** Variables meteorológicas medidas, altura y modelo del sensor usado en las estaciones de Zaragoza y Córdoba

Variable meteorológica	Altura de medida (m)	Modelo de sensor (fabricante)
Temperatura del aire y humedad relativa	1,50	HMP35D (Vaisala)
Radiación neta	1,50	Q-7 (Radiation and Energy Balance Systems, REBS)
Velocidad de viento	2,00	Switching anemometer A100R (Vector Instruments)
Dirección de viento	2,00	Wind vane W200P (Vector Instruments)
Flujo de calor del suelo	0,08 (placas de flujo de calor del suelo)	Dos placas de flujo de calor del suelo HFT1 (REBS)
	0,02-0,06 (temperatura del suelo <sup>(1)</sup> )	TCAV averaging soil temperature probe (Campbell Scientific)

<sup>(1)</sup> Usada para corregir los valores del flujo de calor del suelo, según ASCE (1996).

### 2.2.1.2 El valle del Guadalquivir

En este caso, el estudio se desarrolló en una finca experimental situada sobre las terrazas del río Guadalquivir, cerca de Córdoba. La elevación es de 70 m sobre el nivel del mar, la latitud es de 37° 51' N, y la longitud es de 4° 51' W (Greenwich). La precipitación media anual es de aproximadamente 600 mm, y se registra durante el invierno, la primavera y el otoño, con casi ningún registro de lluvias durante el verano. La temperatura anual media es de 17 °C. Las condiciones advectivas durante el verano son más frecuentes que en Zaragoza. El área es significativamente menos ventosa que el valle del Ebro.

Las medidas se realizaron sobre una parcela de 1,3 ha (115 m x 115 m), que se encontraba uniformemente cubierta de festuca alta (*Festuca arundinacea* Moench.). El suelo de la parcela también se describió como *Typic Xerofluvent* (Soil Survey Staff, 1992). Asimismo, esta parcela se regó y cortó sistemáticamente durante todo el año. El periodo de medidas fue de julio a octubre de 1997 y de julio a agosto de 1998. Sólo los días en los que la altura de la festuca fue de 0,10 a 0,15 m se usaron para el análisis.

Un sistema de covarianza de torbellinos de Campbell Scientific se instaló en el centro de la parcela para medir la  $ET_0$ . Los sensores incluyeron un higrómetro de kriptón (modelo KH20), un anemómetro sónico unidimensional (modelo CA27), así como dos termopares de hilo fino (modelos 127 y TCBR-3), unidos a los dos sensores previamente mencionados. Las medidas de las fluctuaciones de la densidad del vapor de agua, de la velocidad del viento vertical y de la temperatura del aire se registraron cada 0,1 s y se promediaron cada 10 minutos. Estas lecturas se usaron para obtener valores medidos horarios de flujo de calor latente, siguiendo el procedimiento descrito por Villalobos (1997). Estos valores se transformaron en tasas horarias de  $ET_0$  dividiendo por el calor latente de vaporización derivado de las medidas de temperatura del aire, siguiendo a Allen et al. (1998). Las tasas medidas de  $ET_0$  diaria se obtuvieron sumando los valores horarios. Asimismo, una estación meteorológica automática (Campbell Scientific CR10) se localizó cerca del sistema de covarianza de torbellinos. Las variables meteorológicas medidas, así como los modelos de los sensores, los fabricantes y las alturas de medida fueron las mismas que las usadas en el caso del valle del Ebro (Tabla 2.1).

## 2.2.2 Cálculos de $ET_0$

### 2.2.2.1 La ecuación de Penman-Monteith

La conocida ecuación de Penman-Monteith se basa en la ecuación de Penman (1948), un método de combinación del balance de energía y de la transferencia de masa usado para calcular la evaporación desde una superficie libre de agua. Monteith (1965) introdujo el efecto de la arquitectura foliar y de la regulación estomática de la cubierta vegetal sobre la difusión del vapor de agua desde una superficie cultivada. Estos efectos se modelizaron con ayuda de la resistencia de la cubierta vegetal ( $r_c$ ) y de la resistencia aerodinámica ( $r_a$ ). La resistencia de la cubierta vegetal representa la resistencia al flujo de vapor de agua desde las superficies evaporantes (los estomas y la superficie del suelo), mientras que la resistencia aerodinámica representa la resistencia al flujo del aire sobre la cubierta vegetal. Una hipótesis importante de este modelo es que toda la cubierta vegetal se puede considerar como una “gran hoja” desde la que escapan el calor y el vapor de agua. Esta “gran hoja” está situada a una altura  $d+z_{0m}$ , donde  $d$  es la altura del plano de cero desplazamiento y  $z_{0m}$ , la longitud de rugosidad para el *momentum*. Así, la ecuación de Penman-Monteith se puede escribir como (Allen et al., 1998):

$$\lambda ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p (e_s - e_a)/r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \quad [2.1]$$

donde  $ET_0$  es la evapotranspiración de referencia,  $\lambda$  es el calor latente de vaporización,  $R_n$  es la radiación neta,  $G$  es el flujo de calor del suelo,  $\Delta$  es la pendiente de la curva de la presión de saturación del vapor frente a la temperatura,  $\rho_a$  es la densidad del aire media a presión constante,  $c_p$  es el calor específico del aire,  $e_s$  es la presión de saturación del vapor,  $e_a$  es la presión de vapor real y  $\gamma$  es la constante psicrométrica. En este capítulo, se usaron valores medidos de  $R_n$  y  $G$  en lugar de valores estimados para evitar el efecto de la incertidumbre de su estimación, particularmente de cara a estimar los valores de  $r_c$ . Las unidades y los cálculos necesarios para resolver la ecuación [2.1] ( $\lambda$ ,  $\Delta$ ,  $\rho_a$ ,  $c_p$ ,  $e_s$ ,  $e_a$  y  $r_a$ ) fueron los descritos por Allen et al. (1998), excepto para  $R_n$  y  $G$ . El valor de  $r_c$  se consideró constante e igual a  $70 \text{ s m}^{-1}$ , y la altura de la festuca se supuso igual a  $0,12 \text{ m}$  (Allen et al., 1998). La ecuación [2.1] se usó para obtener estimas diarias de  $ET_0$  usando valores medios diarios de las variables meteorológicas ( $ET_{24F}$ ). Adicionalmente, la ecuación [2.1] se usó para obtener estimas horarias de  $ET_0$  a partir de valores horarios de las variables

meteorológicas; dichas estimas se sumaron para obtener valores diarios de evapotranspiración ( $ET_{sumF}$ ). Estos cálculos se realizaron para los periodos de tiempo detallados en las secciones 2.2.1.1 y 2.2.1.2.

### 2.2.2.2 El modelo de Katerji y Perrier

Katerji y Perrier (1983) propusieron un modelo en el que la resistencia del cultivo depende de variables climatológicas. El modelo se basa en un desarrollo previo de Perrier (1975) y usa hipótesis similares a las de Monteith (1965). Así, se supone que la difusión de vapor desde el cultivo se ve influida por la arquitectura de la cubierta vegetal y por la regulación estomática de las hojas. Sin embargo, la condición de contorno de conservación de la energía se aplica sobre la cubierta. En otras palabras, la “gran hoja” se coloca a la altura del cultivo, de forma que la resistencia aerodinámica ( $r_{akp}$ ) se calcula desde la parte superior de la cubierta hasta la altura de referencia (Alves y Pereira, 2000):

$$r_{akp} = \frac{\ln[(z_m - d)/z_{0m}] \ln[(z_h - d)/(h_c - d)]}{k^2 u_{zm}} \quad [2.2]$$

donde  $z_m$  es la altura de medida del viento,  $z_h$  es la altura de medida de la temperatura,  $h_c$  es la altura media del cultivo,  $k$  es la constante de von Karman y  $U$  es la velocidad del viento. El término  $h_c - d$  sustituye a  $z_{oh}$  (altura de rugosidad para la transferencia de calor) que se usó para calcular  $r_a$ , según Allen et al. (1998). De nuevo,  $h_c$  se fijó en 0,12 m.

Perrier et al. (1980) mostraron evidencia experimental acerca de la relación entre la resistencia aerodinámica, la resistencia de la cubierta vegetal y una resistencia crítica ( $r^*$ ), que representa la resistencia del cultivo para la evaporación de equilibrio, y que depende de factores climáticos (Pereira et al., 1999):

$$r^* = \frac{\Delta + \gamma}{\Delta} \frac{\rho_a c_p (e_s - e_a)}{\gamma (R_n - G)} \quad [2.3]$$

Así, Katerji y Perrier (1983) desarrollaron el siguiente modelo lineal para la resistencia del cultivo, que fue aplicado con éxito a festuca y alfalfa:

$$\frac{r_c}{r_{aKP}} = c_0 + c_1 \left( \frac{r^*}{r_{aKP}} \right) \quad [2.4]$$

donde  $c_0$  y  $c_1$  son parámetros que deben ser determinados experimentalmente por regresión y que pueden variar entre localidades. Otra restricción de este modelo es que sólo debe aplicarse dentro de un rango limitado de valores de la razón de Bowen. Así, Alves y Pereira (2000) indicaron que la ecuación [2.4] sólo es válida para periodos en que la razón de Bowen varía entre  $-0,3$  y  $0,3$ . Este modelo fue también aplicado a trigo (Perrier et al. 1980), tomate (Katerji et al., 1988) y arroz (Peterschmitt y Perrier, 1991). Alves et al. (1999) y Alves y Pereira (2000) presentaron una discusión detallada acerca del significado físico de los parámetros de regresión de la ecuación [2.4].

Para poder aplicar el modelo de Katerji y Perrier (1983), los datos disponibles en cada localidad se dividieron en dos grupos: a) grupo de calibración; b) grupo de validación. Los días disponibles se ordenaron por fecha y uno de cada tres días se incluyó en el grupo de calibración, mientras que los dos restantes se incluyeron en el grupo de validación. En el grupo de datos de calibración, los valores diarios y horarios de  $r_c$  se obtuvieron resolviendo la ecuación de Penman-Monteith [2.1] usando valores diarios y horarios de  $ET_0$  medida, respectivamente, y las variables meteorológicas correspondientes. Las ecuaciones [2.2] y [2.3] se usaron para obtener valores de las resistencias aerodinámica y crítica (diarios y horarios), respectivamente. Posteriormente, una regresión lineal simple entre  $r_c/r_{aKP}$  y  $r^*/r_{aKP}$  se estableció para obtener valores diarios y horarios de los parámetros  $c_0$  y  $c_1$  para las dos localidades, Zaragoza y Córdoba. En el caso de los valores horarios, sólo aquellos periodos para los que la razón de Bowen se situó entre  $-0,5$  y  $0,5$  se usaron para el análisis de regresión lineal. La mayoría de los períodos horarios diurnos se situaron dentro de este rango de valores de la razón de Bowen. Finalmente, los valores calibrados de los parámetros  $c_0$  y  $c_1$  y las ecuaciones [2.1] a [2.4] se utilizaron con el grupo de datos de validación para obtener estimas diarias de  $ET_0$ : a) aplicando directamente estas ecuaciones a valores medios diarios de las variables meteorológicas registradas ( $ET_{24KP}$ ); b) aplicándolas a valores horarios y sumando las estimaciones horarias de  $ET_0$  ( $ET_{sumKP}$ ). En el caso de los valores medios horarios se consideró un valor fijo de  $r_c$  para las horas nocturnas ( $200 \text{ s m}^{-1}$ ).

### 2.2.2.3 El modelo de Todorovic

Una discusión detallada del modelo y de las hipótesis usadas en este modelo se puede encontrar en Todorovic (1999). En este trabajo se presentan únicamente las ecuaciones usadas para la estimación de  $r_c$ . Todorovic (1999) define una resistencia climatológica ( $r_i$ ) como:

$$r_i = \frac{\rho c_p (e_s - e_a)}{\gamma (R_n - G)} \quad [2.5]$$

Posteriormente, Todorovic (1999) usa las variables  $r_i$  y  $r_a$ , tal como la definen Allen et al. (1998), para establecer la siguiente ecuación de segundo grado:

$$a \left( \frac{r_c}{r_i} \right)^2 + b \left( \frac{r_c}{r_i} \right) + c = 0 \quad [2.6]$$

donde:

$$a = \frac{\Delta + \gamma (r_i / r_a)}{\Delta + \gamma} (r_i / r_a) (e_s - e_a) \quad [2.7]$$

$$b = -\gamma \left( \frac{r_i}{r_a} \right) \frac{\gamma (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma} \quad [2.8]$$

$$c = -(\Delta + \gamma) \frac{\gamma (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma} \quad [2.9]$$

La ecuación [2.6] sólo tiene una solución positiva. La ecuaciones [2.6] a [2.9] se aplicaron sólo al conjunto de datos de la validación para obtener estimas diarias y horarias de  $r_c$  usando los valores correspondientes de medias diarias y horarias de las variables meteorológicas. Como en el caso del modelo de Katerji y Perrier, un valor fijo de  $r_c$  ( $200 \text{ s m}^{-1}$ ) se usó para los intervalos horarios nocturnos. Así, estos datos variables de  $r_c$  se usaron, suponiendo una altura de la festuca de 0,12 m, para obtener estimas diarias de  $ET_0$ : a) aplicando directamente la ecuación [2.1] a promedios diarios de las variables meteorológicas registradas

( $ET_{24h}$ ); b) aplicándola a medias horarias y sumando posteriormente los valores estimados de  $ET_0$  ( $ET_{sum7}$ ).

### 2.2.3 Análisis estadísticos

Las comparaciones entre valores diarios estimados y medidos de  $ET_0$  se realizaron por regresión lineal ( $y = b_0 + b_1 x$ ), dónde los valores medidos se usaron como la variable dependiente y los valores estimados se usaron como la variable independiente  $x$ . Adicionalmente, se calcularon los siguientes estadísticos, propuestos por Willmott (1982): raíz cuadrada del error cuadrático medio ( $RMSE$ ), error cuadrático medio sistemático ( $MSEs$ ) e índice de similitud ( $IA$ ).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad [2.10]$$

$$MSEs = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - x_i)^2 \quad [2.11]$$

$$IS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n \left[ |y_i - \bar{x}| + |x_i - \bar{x}| \right]^2} \quad [2.12]$$

donde  $y_i$  es el  $i$ -ésimo valor observado de  $ET_0$ ,  $x_i$  es el  $i$ -ésimo valor estimado de  $ET_0$ ,  $\hat{y}_i$  es el  $i$ -ésimo valor predicho de  $ET_0$  con el modelo de regresión lineal y  $\bar{x}$  es la media de los valores estimados.

## 2.3 Resultados y discusión

La Tabla 2.2 presenta algunos estadísticos de los registros de temperatura del aire y velocidad del viento durante el periodo de medidas en las dos localidades (Zaragoza y Córdoba). Estos valores se presentan únicamente a efectos descriptivos puesto que no es posible realizar una comparación de las dos localidades debido a que los periodos de medida fueron diferentes. La característica más importante de la Tabla 2.2 es que en Córdoba no se encontraron días con velocidad del viento superior a  $4,0 \text{ m s}^{-1}$ , mientras que esta circunstancia se produjo en el 9 % de los días en Zaragoza. Tal como se discute en la sección 2.1.1, Zaragoza está situada en una de las zonas más ventosas de España.

**Tabla 2.2** Condiciones meteorológicas (temperatura del aire máxima y mínima y velocidad del viento) durante el periodo de medidas en Zaragoza y Córdoba

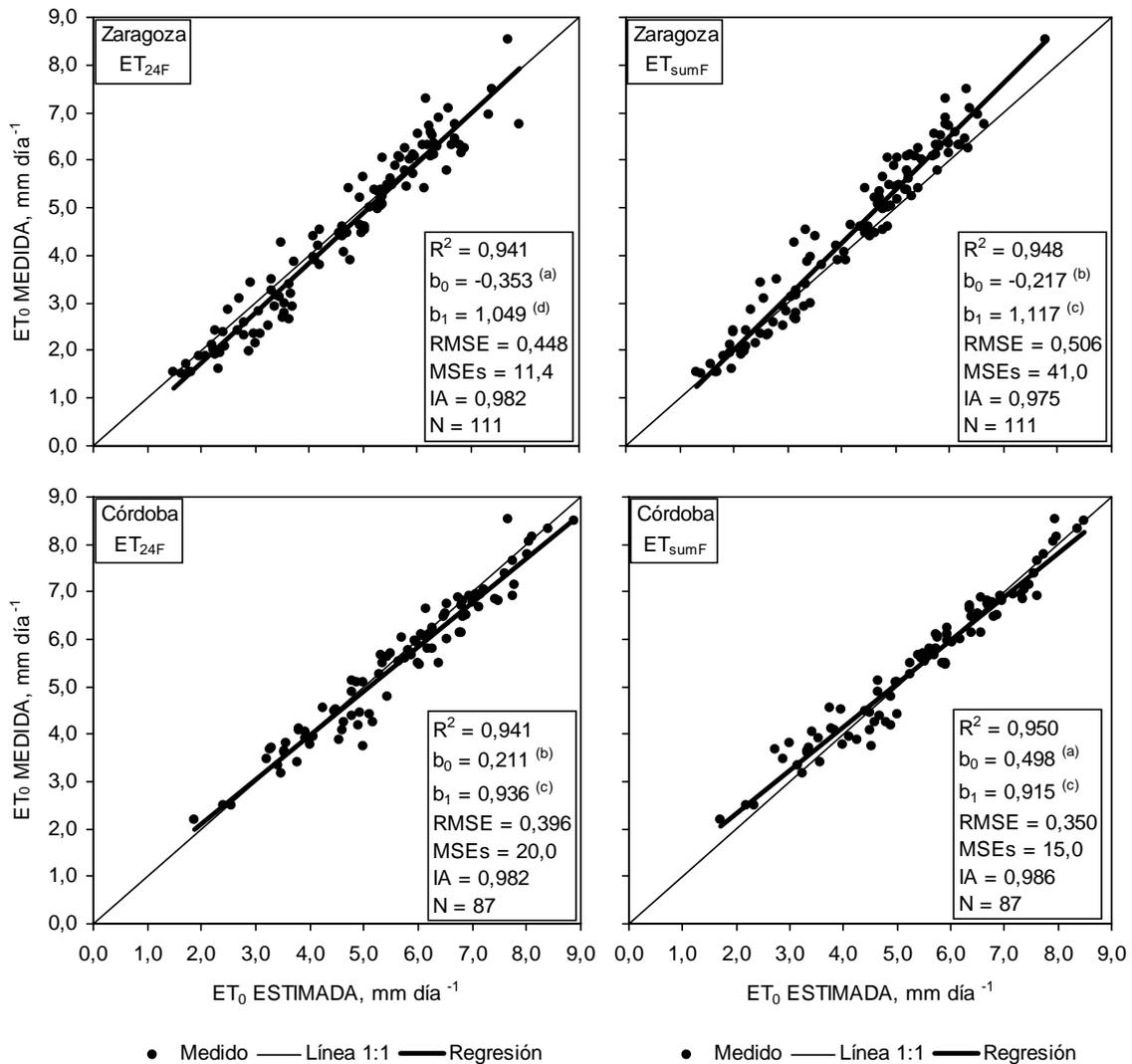
Variable meteorológica	Zaragoza			Córdoba		
	Media	Máxima	Mínima	Media	Máxima	Mínima
Temperatura máxima (°C)	26,6	38,2	12,1	33,3	38,6	24,4
Temperatura mínima (°C)	11,3	20,1	-2,6	18,2	22,7	9,2
Velocidad media del viento ( $\text{m s}^{-1}$ )	2,1	7,6	0,4	1,7	3,6	0,7
Días con velocidad de viento media $> 4,0 \text{ m s}^{-1}$ (%)	9,0			0,0		

### 2.3.1 Estimación con valores de $r_c$ fijos

La Figura 2.2 muestra los resultados de la regresión lineal simple y del análisis del error de la comparación entre valores diarios medidos y estimados (usando un valor fijo de  $r_c$ ) de  $ET_0$  para todo el periodo de medidas en las dos localidades. Todos los coeficientes de determinación fueron altos, superiores a 0,94, mientras que todos los índices de similitud superaron un valor de 0,97. Estos resultados sugieren que la similitud entre los valores medidos y estimados de  $ET_0$  resultó ser muy buena, independientemente de que se usaran valores medios diarios de las variables meteorológicas o sumas de estimaciones horarias. Por otro lado, estos resultados indican que la dispersión de los valores fue relativamente pequeña (Figura 2.2). Las estimas de  $ET_{sumF}$  fueron más bajas que las de  $ET_{24F}$  en las dos localidades. Esta circunstancia ha sido observada en otras localidades (Allen et al., 1994a, b). De acuerdo con los análisis de la regresión y de los estadísticos de error, las diferencias entre  $ET_{24F}$  y  $ET_{sumF}$  fueron mayores en

Zaragoza. En esta localidad se apreció una tendencia de la ecuación de Penman-Monteith a sobreestimar la  $ET_0$  medida en condiciones de baja demanda evaporativa y a subestimarla en condiciones de alta demanda evaporativa (Figura 2.2), particularmente para el caso de  $ET_{sumF}$ . En el caso de  $ET_{24F}$ , esta subestimación en condiciones de alta demanda evaporativa resultó despreciable. En Córdoba se observó una tendencia opuesta, aunque la similitud entre valores medidos y estimados de  $ET_0$  fue más alta que en Zaragoza, de acuerdo con los resultados de la Figura 2.2. Este comportamiento de la ecuación de Penman-Monteith, con sobreestimación para valores bajos de  $ET_0$  y subestimación para valores altos de  $ET_0$ , ha sido descrito en otras localidades mediterráneas (Steduto et al., 1996). Una razón para el diferente comportamiento observado en Córdoba puede ser la incertidumbre ligada a cualquier procedimiento de medida. Se ha publicado que los sistemas de covarianza de torbellinos pueden subestimar esta variable en algunas circunstancias que dependen de la separación y altura de medida del sensor horizontal, entre otros factores (Foken y Wichura, 1996). En este trabajo se aplicó el método propuesto por Villalobos (1997) para corregir este problema, y se evaluó el cierre de balance de energía para cada día. Sólo aquellos días en los que el error de cierre del balance de energía fue inferior al 10 % del flujo de calor latente ( $\lambda E$ ) se usaron para los análisis descritos.

Otra posible razón para explicar las diferencias entre las dos localidades es la diferencia en las condiciones de viento. En Zaragoza se registra típicamente una mayor velocidad de viento que en Córdoba (Tabla 2.2). La similitud entre los valores de  $ET_0$  medidos con el lisímetro y los estimados con la ecuación de Penman-Monteith depende de la velocidad del viento, y disminuye cuando ésta aumenta (Lecina y Martínez-Cob, 2000). Bajo condiciones de alta demanda evaporativa (generalmente durante días soleados de verano), se espera que las tasas de  $ET_0$  aumenten en presencia de viento. En estas situaciones, la ecuación de Penman-Monteith con un valor fijo de  $r_c$  fue aparentemente incapaz de reproducir con precisión el flujo de vapor de agua desde los cultivos a la atmósfera, y llevó a una subestimación de la  $ET_0$  (Rana et al., 1994; Steduto et al., 1996; Pereira et al., 1999; Todorovic, 1999; Ventura et al., 1999).



**Figura 2.2** Regresión lineal simple ( $y = b_0 + b_1 x$ ) y estadísticas de análisis de error de la comparación entre valores medidos (variable dependiente  $y$ ) y estimados (variable independiente  $x$ ) de los valores diarios de  $ET_0$  en dos localidades, Zaragoza y Córdoba, para todo el periodo de medida. Las estimas se obtuvieron usando la ecuación de Penman-Monteith con un valor fijo de  $r_c$  ( $70 \text{ s m}^{-1}$ ), usando promedios diarios de las variables meteorológicas ( $ET_{24F}$ ) o sumando las estimas horarias ( $ET_{sumF}$ ).  $R^2$ , coeficiente de determinación ( $^0/1$ );  $b_0$ , ordenada en el origen ( $\text{mm d}^{-1}$ );  $b_1$ , pendiente de la regresión (adimensional); RMSE, raíz cuadrada del error cuadrático medio ( $\text{mm día}^{-1}$ ); MSEs, error cuadrático medio sistemático (%); IA, índice de similitud ( $^0/1$ ); N, tamaño de la muestra. <sup>(a)</sup>  $b_0$  es significativamente diferente de 0; <sup>(b)</sup>  $b_0$  no es significativamente diferente de 0; <sup>(c)</sup>  $b_1$  es significativamente diferente de 1; <sup>(d)</sup>  $b_1$  no es significativamente diferente de 1 ( $\alpha = 0,95$ )

Bajo estas condiciones de alta demanda evaporativa y fuerte viento, la subestimación de los valores horarios se suma cuando éstos se usan para obtener estimas diarias, lo que refuerza la subestimación. Cuando se usan promedios diarios de las variables meteorológicas, algunos errores tienden a compensarse, proporcionando mejores estimas de  $ET_0$ . Así, por ejemplo, Allen et al. (1994a, b) señalaron que el déficit diario de presión de vapor se puede sobreestimar cuando se calcula a partir de valores máximos y mínimos de temperatura del aire y humedad relativa en lugar de promediar los valores horarios del déficit de presión de vapor. Este error puede sin embargo verse compensado por la subestimación que se podría esperar de usar una velocidad del viento media diaria en lugar de la velocidad media del viento diurno en los cálculos de  $ET_0$ .

### 2.3.2 Calibración del modelo de Katerji y Perrier

La Tabla 2.3 muestra los parámetros  $c_0$  y  $c_1$  de la ecuación [2.4], determinados por regresión para el periodo de calibración en las dos localidades (Zaragoza y Córdoba). Los coeficientes de correlación resultaron ser entre moderados y moderadamente altos. Los mejores valores de  $R^2$  se obtuvieron cuando se usaron las estimas horarias de  $r_c$ . Para este último caso, los valores de  $R^2$  fueron ligeramente inferiores a los descritos por Alves y Pereira (2000), pero el periodo de medidas fue más largo en este trabajo, por lo que los cambios meteorológicos entre días dentro de cada día pudieron ser mayores. Las estimas diarias de  $r_c$  obtenidas por inversión de la ecuación de Penman-Monteith mostraron grandes variaciones entre días. Esto parece ser debido a los errores diarios y a las desviaciones en el lisímetro y en los instrumentos meteorológicos (Todorovic, 1999). Así, para el período de calibración, el 27,0 y 13,8 % de las estimas diarias de  $r_c$  resultaron inferiores a  $70 \text{ s m}^{-1}$  en Zaragoza y Córdoba, respectivamente, mientras que el 43,2 y 55,2 % de estas estimas resultaron ser superiores a  $100 \text{ s m}^{-1}$ . Las estimas horarias de  $r_c$  se limitaron a los períodos en los que el valor absoluto de la razón de Bowen resultó ser inferior a 0,5, por lo que se observó una menor variabilidad que se corresponde con una mejor  $R^2$  en la Tabla 2.3.

Alves y Pereira (2000) indicaron que  $c_0$  y  $c_1$  son función de la razón de Bowen. Sin embargo, un conocimiento previo de la partición de la energía sería necesario para usar esas funciones para estimar  $r_c$  para su uso directo en la ecuación de Penman-Monteith. Si se usan regresiones para obtener expresiones para  $c_0$  y  $c_1$ , tal como se hace en este capítulo, la necesidad de una calibración

previa del modelo de Katerji y Perrier se perfila como una importante limitación para su uso generalizado.

**Tabla 2.3** Parámetros del modelo de Katerji y Perrier, ecuación [2.4], obtenidos por regresión en Zaragoza y Córdoba para el periodo de calibración: a) usando estimaciones de  $r_c$  de 24 horas; b) usando estimas horarias de  $r_c$ .  $N$ , tamaño muestral;  $R^2$ , coeficiente de determinación;  $c_0$ , ordenada en el origen;  $c_1$ , pendiente de la regresión

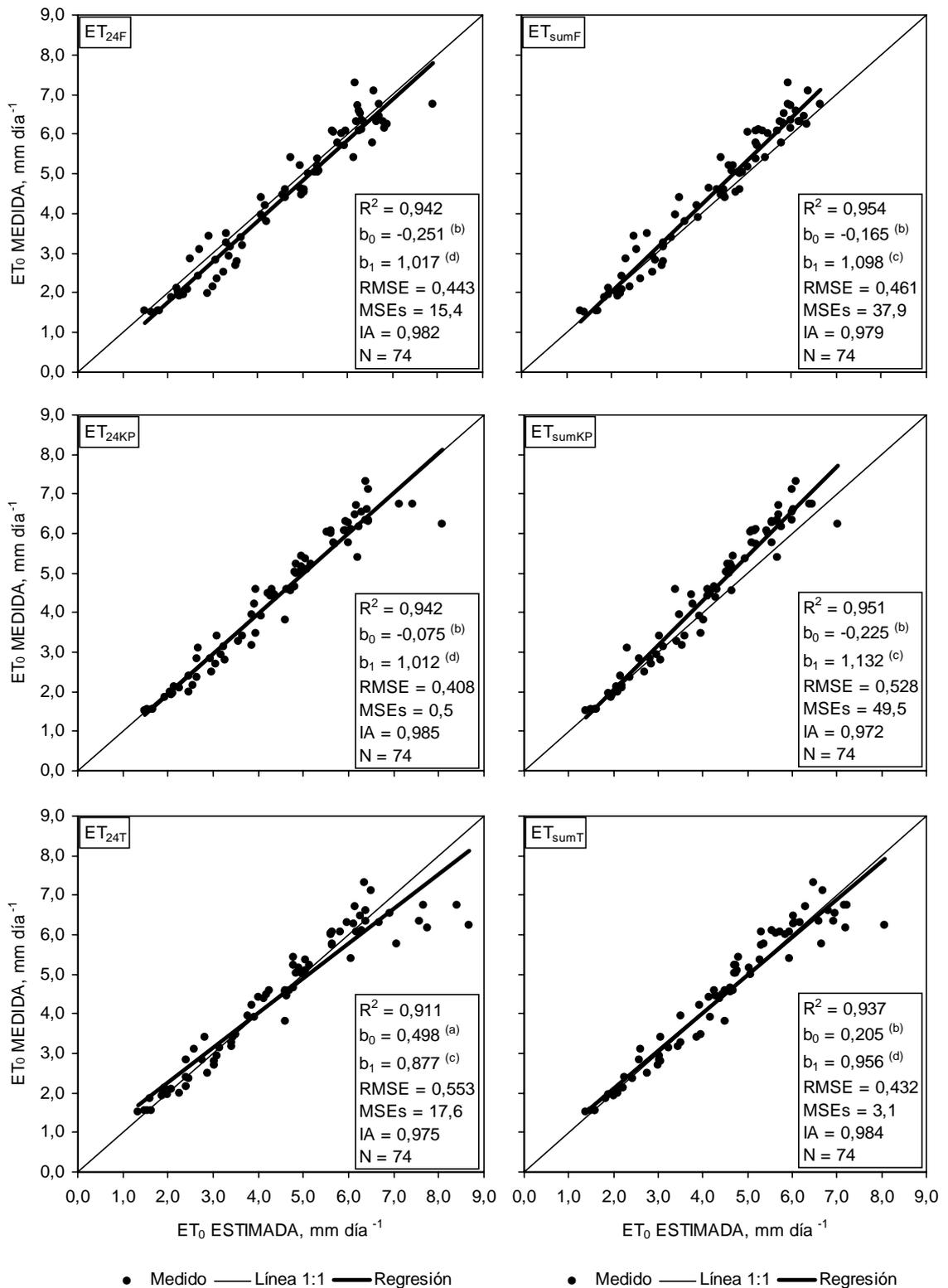
Localidad	Estima de $r_c$	$N$	$R^2$ ( $^0/1$ ) (adimensional)	$c_0$ (adimensional)	$c_1$ (adimensional)
Zaragoza	24 horas	37	0,414	0,759 <sup>(1)</sup>	0,175 <sup>(1)</sup>
	Horaria	356	0,725	0,395 <sup>(1)</sup>	0,385 <sup>(1)</sup>
Córdoba	24 horas	29	0,557	0,042 <sup>(2)</sup>	0,330 <sup>(1)</sup>
	Horaria	301	0,780	0,377 <sup>(1)</sup>	0,340 <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Significativamente diferente de 0 ( $\alpha = 0,95$ )

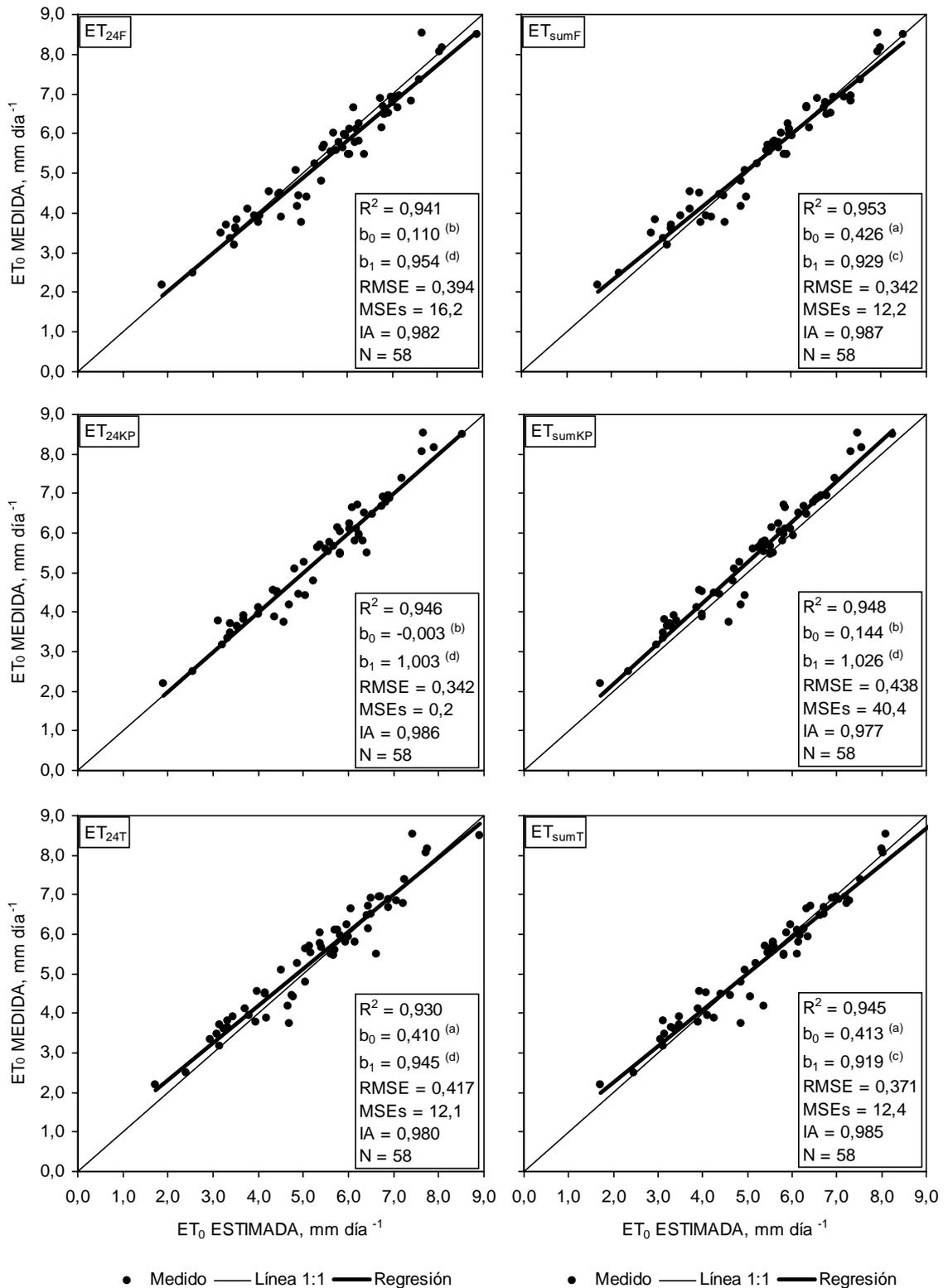
<sup>(2)</sup> No significativamente diferente de 0 ( $\alpha = 0,95$ )

### 2.3.3 Estimación con valores de $r_c$ variables

La Figura 2.3 muestra los resultados de la regresión lineal simple y el análisis de errores de la comparación entre valores diarios medidos y estimados de  $ET_0$  para el grupo de datos de validación de Zaragoza, para cada uno de los modelos de  $r_c$  analizados (valor fijo, Katerji y Perrier, y Todorovic), usando valores obtenidos a partir de medias de 24 horas de variables meteorológicas o sumando estimaciones horarias. La Figura 2.4 muestra el mismo tipo de resultados para Córdoba. Los resultados indican que no hubo una gran diferencia entre el uso de un valor fijo o un valor variable de  $r_c$ . Todos los coeficientes de determinación y los índices de similitud resultaron ser superiores a 0,91 y 0,97, respectivamente. Los valores de  $RMSE$  fueron inferiores a  $0,55 \text{ mm día}^{-1}$  y la mayoría de ellos oscilaron entre  $0,34$  y  $0,46 \text{ mm día}^{-1}$ . Quizás, las diferencias más importantes se registraron en algunos casos en el estadístico  $MSEs$ . En cualquier caso, alguna mejoría se apreció en las dos localidades al introducir valores variables de  $r_c$ .



**Figura 2.3** Regresión lineal simple ( $y = b_0 + b_1 x$ ) y estadísticas del análisis de errores de la comparación entre valores medidos (variable dependiente  $y$ ) y estimados (variable independiente  $x$ ) de valores diarios de  $ET_0$  en Zaragoza para el grupo de datos de validación. Las estimas se obtuvieron usando la ecuación de Penman-Monteith con: a) un valor fijo de  $r_c$ , usando promedios de 24 horas de las variables meteorológicas ( $ET_{24F}$ ) o sumando las estimas horarias ( $ET_{sumF}$ ); b) valores variables de  $r_c$  (modelo de Katerji y Perrier), usando promedios de 24 horas de las variables meteorológicas ( $ET_{24KP}$ ) o sumando las estimas horarias ( $ET_{sumKP}$ ); y c) valores de  $r_c$  variables (modelo de Todorovic), usando promedios de 24 horas de las variables meteorológicas ( $ET_{24T}$ ) o sumando las estimas horarias ( $ET_{sumT}$ ).  $R^2$ , coeficiente de determinación;  $b_0$ , ordenada en el origen;  $b_1$ , pendiente de la regresión; RMSE, raíz cuadrada del error cuadrático medio ( $\text{mm día}^{-1}$ ); MSEs, error cuadrático medio sistemático (%); IA, índice de similitud ( $^0/1$ ); N, tamaño de la muestra. <sup>(a)</sup>  $b_0$  es significativamente diferente de 0; <sup>(b)</sup>  $b_0$  no es significativamente diferente de 0; <sup>(c)</sup>  $b_1$  es significativamente diferente de 1; <sup>(d)</sup>  $b_1$  no es significativamente diferente de 1 ( $\alpha = 0,95$ )



**Figura 2.4** Regresión lineal simple ( $y = b_0 + b_1 x$ ) y estadísticas del análisis de errores de la comparación entre valores medidos (variable dependiente  $y$ ) y estimados (variable independiente  $x$ ) de valores diarios de  $ET_0$  en Córdoba para el grupo de datos de validación. Las estimas se obtuvieron usando la ecuación de Penman-Monteith con: a) un valor fijo de  $r_c$ , usando promedios de 24 horas de las variables meteorológicas ( $ET_{24F}$ ) o sumando las estimas horarias ( $ET_{sumF}$ ); b) valores variables de  $r_c$  (modelo de Katerji y Perrier), usando promedios de 24 horas de las variables meteorológicas ( $ET_{24KP}$ ) o sumando las estimas horarias ( $ET_{sumKP}$ ); y c) valores de  $r_c$  variables (modelo de Todorovic), usando promedios de 24 horas de las variables meteorológicas ( $ET_{24T}$ ) o sumando las estimas horarias ( $ET_{sumT}$ ).  $R^2$ , coeficiente de determinación;  $b_0$ , ordenada en el origen;  $b_1$ , pendiente de la regresión; RMSE, raíz cuadrada del error cuadrático medio ( $\text{mm día}^{-1}$ ); MSEs, error cuadrático medio sistemático (%); IA, índice de similitud ( $^0/1$ ); N, tamaño de la muestra. <sup>(a)</sup>  $b_0$  es significativamente diferente de 0; <sup>(b)</sup>  $b_0$  no es significativamente diferente de 0; <sup>(c)</sup>  $b_1$  es significativamente diferente de 1; <sup>(d)</sup>  $b_1$  no es significativamente diferente de 1 ( $\alpha = 0,95$ )

Cuando se usó un valor fijo de  $r_c$ , los resultados del periodo de validación resultaron similares a los que se obtuvieron para toda la serie de datos en ambas localidades (Figuras 2.3 y 2.4). De nuevo, las mejores estimas se obtuvieron cuando se usaron promedios diarios de las variables meteorológicas. Cuando se usaron valores de  $r_c$  variables (con el modelo de Katerji y Perrier), se produjo una mejora en la estimación de  $ET_0$  en ambas localidades cuando se usaron medias diarias de las variables meteorológicas. Sin embargo, las estimas diarias de  $ET_0$  obtenidas sumando estimas horarias resultaron peores en ambas localidades cuando se usó el modelo de Katerji y Perrier que cuando se usó un modelo de valor de  $r_c$  fijo (Figuras 2.3 y 2.4). De acuerdo con los resultados de la Tabla 2.3, quizás se debería haber esperado una mejora en la estimación de los valores horarios, pero esto no ocurrió. Tal como se ha comentado previamente, los valores de  $r_c$  mostraron importantes variaciones dentro de cada día y entre días. Además, las condiciones meteorológicas y los valores de la razón de Bowen del periodo de validación fueron ciertamente diferentes de los del periodo de calibración. Los valores de la razón de Bowen en algunos periodos horarios pueden haber estado fuera del rango usado para la calibración (-0,5, 0,5). También se ha publicado que el efecto de los errores de  $r_c$  sobre la estimación de  $ET_0$  es relativamente pequeño (Todorovic, 1999). Estas circunstancias, unidas al posible efecto del promediado de 24 horas (cancelando errores horarios, tal como se ha discutido en 2.3.1),

causaron que los beneficios de aplicar el modelo de Katerji y Perrier sólo fueran perceptibles en el caso de  $ET_{24KP}$ .

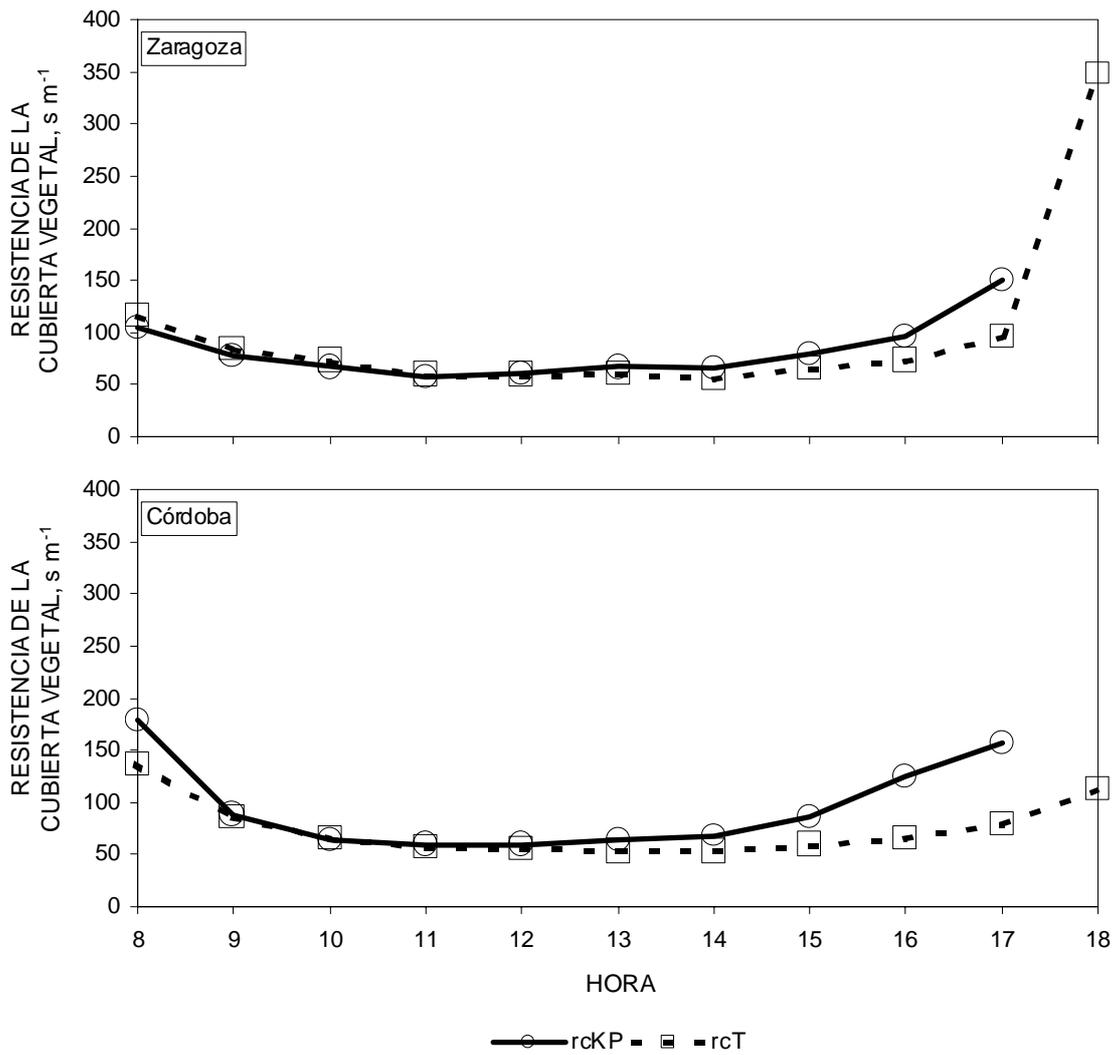
Alves y Pereira (2000) indicaron que los parámetros de la ecuación [2.4] se pueden expresar como función de la razón de Bowen y de la razón  $\Delta/(\Delta + \gamma)$ . Así, la aplicación directa de la ecuación de Penman-Monteith con valores variables de  $r_c$  usando el modelo de Katerji y Perrier requeriría de un conocimiento previo de la partición de energía. Por supuesto, esto no es inmediato y, para aplicaciones prácticas, resultaría más razonable obtener estos parámetros por regresión. Sin embargo, en este caso, la aplicación de este modelo precisa una calibración local previa para identificar los parámetros adecuados de la ecuación [2.4]. La mejora de la estimación de  $ET_0$  mostrada en este trabajo ha sido modesta, y por ello la necesidad de esta calibración local no se ve suficientemente respaldada como para recomendar el uso de valores de  $r_c$  estimados a partir del modelo de Katerji y Perrier, desde un punto de vista práctico.

En cuanto al modelo de Todorovic, se produjo una mejora en la estimación de  $ET_{sumT}$  en Zaragoza. Estas estimas resultaron ser muy similares a las obtenidas en los casos  $ET_{24F}$  y  $ET_{24KP}$ . Sin embargo, en Córdoba, esta mejora fue menor y los resultados para  $ET_{sumT}$  fueron similares a los de  $ET_{24F}$ . En el caso de  $ET_{24T}$ , la aplicación del modelo de Todorovic también empeoró las estimas de  $ET_0$ , particularmente en Zaragoza. Las mejoras obtenidas en Zaragoza para el caso de  $ET_{sumT}$  fueron similares a las publicadas por Todorovic (1999). Sin embargo, este autor también detectó mejoras cuando se usaron medias diarias de las variables meteorológicas.

El modelo de Todorovic se basa en la energía de calor sensible extra proporcionada por la advección. En condiciones de viento, los efectos de la advección aumentan, al menos a escala regional. Esto explicaría por qué la mejora en la estimación de  $ET_0$  ( $ET_{sumT}$ ) fue mayor en Zaragoza.

No están claras las razones por las que se han producido resultados diferentes con los dos modelos ensayados de  $r_c$  variable dependiendo de la escala temporal considerada. La Figura 2.5 muestra los valores medios horarios diurnos (de 8:00 a 18:00, hora del meridiano de Greenwich) de  $r_c$  estimado para el periodo de validación para ambos modelos en las dos localidades. Estos valores de  $r_c$  resultaron relativamente similares en Zaragoza independientemente del modelo, aunque, en general, los valores del modelo de Todorovic fueron inferiores.

En Córdoba, las diferencias entre los dos conjuntos de valores de  $r_c$  fueron mayores, y de nuevo los valores inferiores se correspondieron con los proporcionados por el modelo de Todorovic. Por supuesto, los coeficientes de variación de estos valores medios fueron relativamente elevados, evidenciando las importantes variaciones en las estimas de  $r_c$  entre los días del periodo considerado. Se puede discutir que la estimación horaria de  $ET_0$  y la suma posterior de estas estimas para producir datos diarios debería ser la opción preferida para considerar mejor los efectos meteorológicos sobre el proceso de evapotranspiración y para evitar errores derivados del promediado diario de los datos meteorológicos. Así, el uso del modelo de Todorovic, que parece describir mejor el efecto de la meteorología sobre la variabilidad temporal de  $r_c$  (sin necesitar una calibración previa), llevaría a una disminución en el sesgo de la ecuación de Penman-Monteith cuando se aplica en la escala de tiempo horaria.



**Figura 2.5** Valores medios horarios de la resistencia de la cubierta vegetal estimados en Zaragoza y Córdoba usando los modelos de Katerji y Perrier ( $r_{ckP}$ ) y de Todorovic ( $r_{cT}$ ) para el periodo de validación

## 2.4 Conclusiones

Los resultados presentados en este artículo sugieren que las estimas diarias de  $ET_o$  pueden ser obtenidas con suficiente precisión a partir de la ecuación de Penman-Monteith, usando promedios diarios de las variables meteorológicas y suponiendo un valor fijo de  $r_c$  de  $70 \text{ s m}^{-1}$ , tal como sugirieron Allen et al. (1998), en las condiciones semiáridas de los valles del Ebro y del Guadalquivir. Sin embargo, si se precisan estimas horarias, bien para su uso directo o bien para sumarlas para obtener estimas diarias, el uso del modelo de Todorovic debería considerarse para obtener valores de  $r_c$  al menos para las condiciones semiáridas y ventosas del valle del Ebro. En las condiciones semiáridas del valle del Guadalquivir el uso del modelo de Todorovic no sería tan necesario, pero probablemente no disminuiría la precisión de las estimas.

El uso del modelo de Katerji y Perrier para calcular valores variables de  $r_c$  no debería ser adoptado para casos prácticos debido a las mínimas mejoras de las estimas de  $ET_o$  diaria cuando se usaron promedios diarios de las variables meteorológicas, y la falta de mejora en el caso de sumas de estimas horarias. Esta mejora no compensa el esfuerzo de realizar una calibración local del método.

En resumen, en las condiciones semiáridas de este estudio, resulta recomendable usar un valor fijo de  $r_c$ , tal como proponen Allen et al. (1998), si las estimas diarias de  $ET_o$  se van a calcular a partir de promedios diarios de las variables meteorológicas. El uso del modelo de Todorovic para calcular valores variables de  $r_c$  se recomienda si las estimas diarias de  $ET_o$  van a ser calculadas sumando estimas horarias.

## 2.5 Referencias

- Allen, R.G., Jensen, M.E., Wright, J.L., Burman, R.D. 1989. Operational estimates of evapotranspiration. *Agron. J.* 81, 650-662.
- Allen, R.G., Smith, M., Perrier, A., Pereira, L.S. 1994a. An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bull.*, 43(2), 1-34.
- Allen, R.G., Smith, M., Perrier, A., Pereira, L.S. 1994b. An update for the calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bull.*, 43(2), 35-92.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper n° 56. FAO. Roma (Italia). 300 pp.
- Alves, I., Perrier, A., Pereira, L.S. 1998. Aerodynamic and surface resistances of complete cover crops: how good is the "big leaf"? *Trans. ASAE*, 41(2), 345-351.
- Alves, I., Pereira, L.S. 2000. Modelling surface resistance from climatic variables?. *Agric. Water Manage.*, 42, 371-385.
- ASCE. 1996. *Hydrology Handbook*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 28. American Society of Civil Engineers, Nueva York (EE.UU). 784 pp.
- Berengena J., Gavilán, P., Márquez, F. 2001. Precisión de las estimaciones de la  $ET_0$  en un ambiente advectivo. En: XIX Congreso Nacional de Riegos, Confederación Hidrográfica del Ebro (Eds.), 12-14 Junio 2001, en Zaragoza (España). pp 67-68.
- Choisnel, E., de Villele, O., Lacroze, F. 1992. Une approche uniformisée du calcul de l'évapotranspiration potentielle pour l'ensemble des pays de la Communauté Européene. EUR 14223, Commsission of the European Communities. Luxemburgo (Luxemburgo). 178 pp.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O. 1977. Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper n° 24. FAO. Roma (Italia). 212 pp.
- Foken, T., Wichura, B. 1996. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agric. For. Meteorol.* 78, 83-105.
- Hussein, A.S.A. 1999. Grass ET estimates using Penman-type equations in Central Sudan. *J. Irrig. and Drain. Engr.*, ASCE, 125(6), 324-329.

Jarvis, P.G. 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Phil. Trans. R. Soc. Lon. B.* 273, 595-610.

Jensen, M.E., Burman, R.D., Allen, R.G. 1990. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 70. American Society of Civil Engineers. Nueva York (EE.UU). 332 pp.

Katerji, N., Perrier, A. 1983. Modélisation de l'évapotranspiration réelle d'une parcelle de luzerne: rôle d'un coefficient culturale. *Revue d'agronomie*, 3(6), 513-521.

Katerji, N., Itier, B., Ferreira, M.L. 1988. Etudes de quelques critères indicateurs de l'état hydrique d'une culture de tomate en région semi-aride. *Agronomie*, 5, 425-433.

Lecina, S., Martínez-Cob, A. 2000. Evaluación lisimétrica de la evapotranspiración de referencia semihoraria calculada con el método FAO Penman-Monteith. En: XVIII Congreso Nacional de Riegos, Junta de Andalucía (Eds.), 20-22 Junio 2000, en Huelva (España). pp 37-38.

Monteith, J.L. 1965. Evaporation and environment. In: Fogg, G. (ed.) *The state and movement of water in living organisms*. Symp. of the Soc. for Exper. Biol. XIX Cambridge University Press. Cambridge (Reino Unido). pp 205-234.

Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London*, 193, 120-146.

Pereira, L.S., Perrier, A., Allen, R.G., Alves, I. 1999. Evapotranspiration: concepts and future trends. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, 125(5), 235-245.

Perrier, A. 1975. Etude de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. III Evapotranspiration réelle et potentielle des couverts végétaux. *Ann. Agron.*, 26, 229-243.

Perrier, A., Katerji, M., Gosse, G., Itier, B. 1980. Etude "in situ" de l'évapotranspiration réelle d'une culture de blé. *Agric. Meteor.*, 21, 295-311.

Peterschmitt, J.M., Perrier, A. 1991. Evapotranspiration and canopy temperature of rice and groundnut in southeast Coastal India. Crop coefficient approach and relationship between evapotranspiration and canopy temperature. *Agric. Forest. Meteor.*, 56, 273-298.

Rana, G., Katerji, N., Mastroilli, M., El Moujabber, M. 1994. Evapotranspiration and canopy resistance of grass in a Mediterranean region. *Theor. Appl. Climatol.*, 50, 61-71.

Rana, G., Katerji, N. 2000. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *Europ. J. Agronomy*, 13, 125-153.

Smith, M., Allen, R.G., Monteith, J.L., Perrier, A., Pereira, L.S., Segeren, A. 1991. Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. FAO Land and Water Development Division. FAO. Roma (Italia). 45 pp.

Soil Survey Staff. 1992. Keys to soil taxonomy. Pocahontas Press, Inc. Balcksbourg (EE.UU.). 541 pp.

Steduto, P., Caliendo, A., Rubino, P., Ben Mechlia, N., Masmoudi, M., Martínez-Cob, A., Faci, J.M., Rana, G., Mastrorilli, M., El Mourid, M., Karrou, M., Kanber, R., Kirda, C., El-Quosy, D., El-Askari, K., Ait Ali, M., Zareb, D., Snyder, R.L. 1996. Penman-Monteith reference evapotranspiration estimates in the mediterranean region. En: Camp C.R., Sadler, E.J., Yoder, R.E. (Eds). Proc. Int. Conf. On Evapotranspiration and Irrig. Scheduling, November 3-6 1996, en San Antonio, (EE.UU.). pp 357-364.

Todorovic, M. 1999. Single-layer evapotranspiration model with variable canopy resistance. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, 125(5), 235-245.

Ventura, F., Spano, D., Duce, P., Snyder, R. L. 1999. An evaluation of common evapotranspiration equations. *Irrig. Sci.* 18(4), 163-170.

Villalobos, F.J. 1997. Correction of eddy covariance water vapor flux using additional measurements of temperature. *Agric. For. Meteorol.* 88, 77-83.

Willmott, C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bul. Am. Meteorol. Soc.*, 63(11), 1309-1313.





## **EVALUACIÓN Y MEJORA DE LOS RIEGOS DE LA COMUNIDAD DE REGANTES V DEL CANAL DE BARDENAS**

**3**

◀ **Escala del aforador de resalto de solera** construido en el desagüe D-XXX-3 de la Comunidad de Regantes V

### 3.1 Introducción

El proceso de modernización de una zona regable debe iniciarse con la realización de un estudio que permita realizar un diagnóstico previo de la situación actual de la misma (Losada, 1994). De esta forma se pueden determinar cuales son los problemas específicos que afectan al uso del agua, y así plantear alternativas de mejora que, tras su posterior evaluación, permitan obtener la mejor solución a dichos problemas.

Las comunidades de regantes, al constituir la unidad básica de gestión del agua dentro de las cuencas, son el primer nivel donde comenzar estos estudios. Así, por ejemplo, Faci et al. (2000) y Playán et al. (2000) realizaron un estudio para la modernización de las 3.579 ha de la comunidad de regantes de Almudévar (Huesca, España). En primer lugar se caracterizaron todos aquellos factores que influían en el uso del agua de esta comunidad de riego por superficie (suelos, clima, relieve, infraestructuras, sistemas de gestión, etc). Posteriormente, y mediante la realización de evaluaciones de riego en campo y la aplicación de un modelo de simulación del riego por superficie, se analizó el funcionamiento de la zona regable sobre la base de estos factores. De este modo se realizó un diagnóstico relativo al aprovechamiento actual del agua. Por último, se plantearon y analizaron con criterios técnicos y económicos una serie de alternativas para la mejora del uso del agua en la zona.

En este mismo sentido Dechmi et al. (2003a, b) abordaron un estudio para analizar el uso del agua y el funcionamiento del regadío por aspersión de las 2.606 ha de la comunidad de regantes de la Loma de Quinto (Zaragoza, España).

Este trabajo se llevó a cabo dentro de un Programa de Mejora de la Gestión (Dedrick et al., 1989), en el que se realizaron diversas evaluaciones de riego en campo, y se utilizaron un modelo balístico de simulación del riego por aspersión y un modelo de cultivos. De esta forma se obtuvieron los parámetros de diseño y manejo que optimizan la uniformidad del riego en la zona.

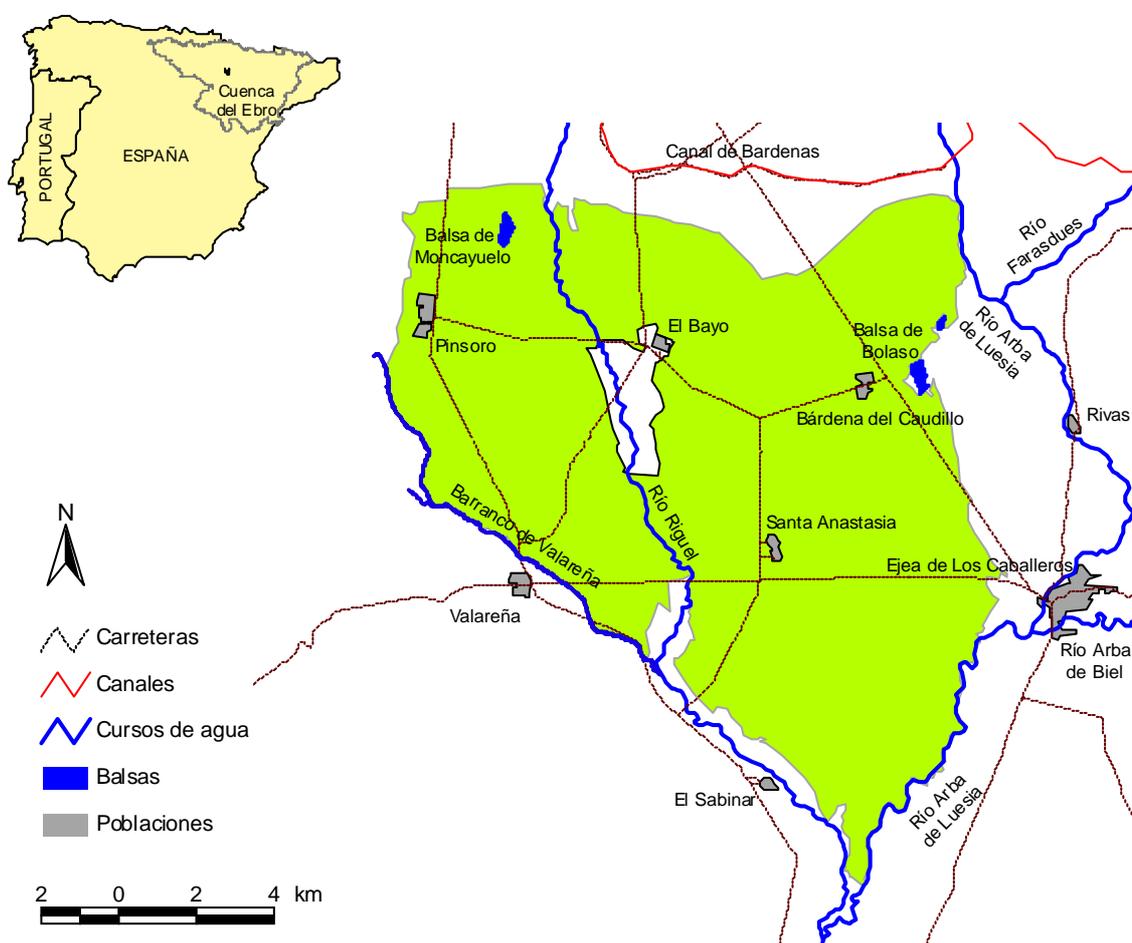
En una línea paralela a estos trabajos a escala de comunidad de regantes, también se han desarrollado otros que pretenden evaluar el funcionamiento del regadío a escala de zona regable (Ray et al., 2002; Bandara, 2003). Para ello se utilizan parámetros hidrológicos obtenidos a partir de imágenes de satélite, estaciones meteorológicas, y estaciones de aforo disponibles en las infraestructuras de distribución de agua. Mediante dichos parámetros se deducen una serie de índices que sirven para monitorizar en el tiempo el nivel de aprovechamiento del agua en la zona de estudio.

En este trabajo se ha evaluado el regadío de la Comunidad de Regantes V del Canal de Bardenas (Zaragoza, España) y se han analizado diferentes alternativas de mejora del mismo. Para ello se llevó a cabo una campaña de trabajo de campo en la que se estudiaron los suelos y se evaluó el riego por superficie de la comunidad a escala de parcela. Los resultados obtenidos en las evaluaciones se extrapolaron a toda la comunidad mediante el uso de un modelo hidrodinámico de simulación del riego por superficie. Dichos resultados se analizaron desde una perspectiva tanto hidrológica como técnica, y se formularon una serie de alternativas de mejora que fueron evaluadas mediante el mismo modelo de simulación.

El objetivo del trabajo ha sido realizar el diagnóstico de la situación actual de una zona regable tradicional, así como determinar las directrices que debe seguir su modernización. Para ello se ha aplicado una metodología que combina la realización de estudios y evaluaciones de campo con la aplicación de modelos de simulación. La modernización de esta zona regable se aborda desde la preferencia de los agricultores de mantener el sistema de riego por superficie, considerando para ello las dos vías posibles: la mejora de las infraestructuras de riego y la mejora de la gestión. La metodología empleada permite establecer una comparación de la efectividad de ambas medidas en este caso particular.

### 3.2 La Comunidad de Regantes V del Canal de Bardenas

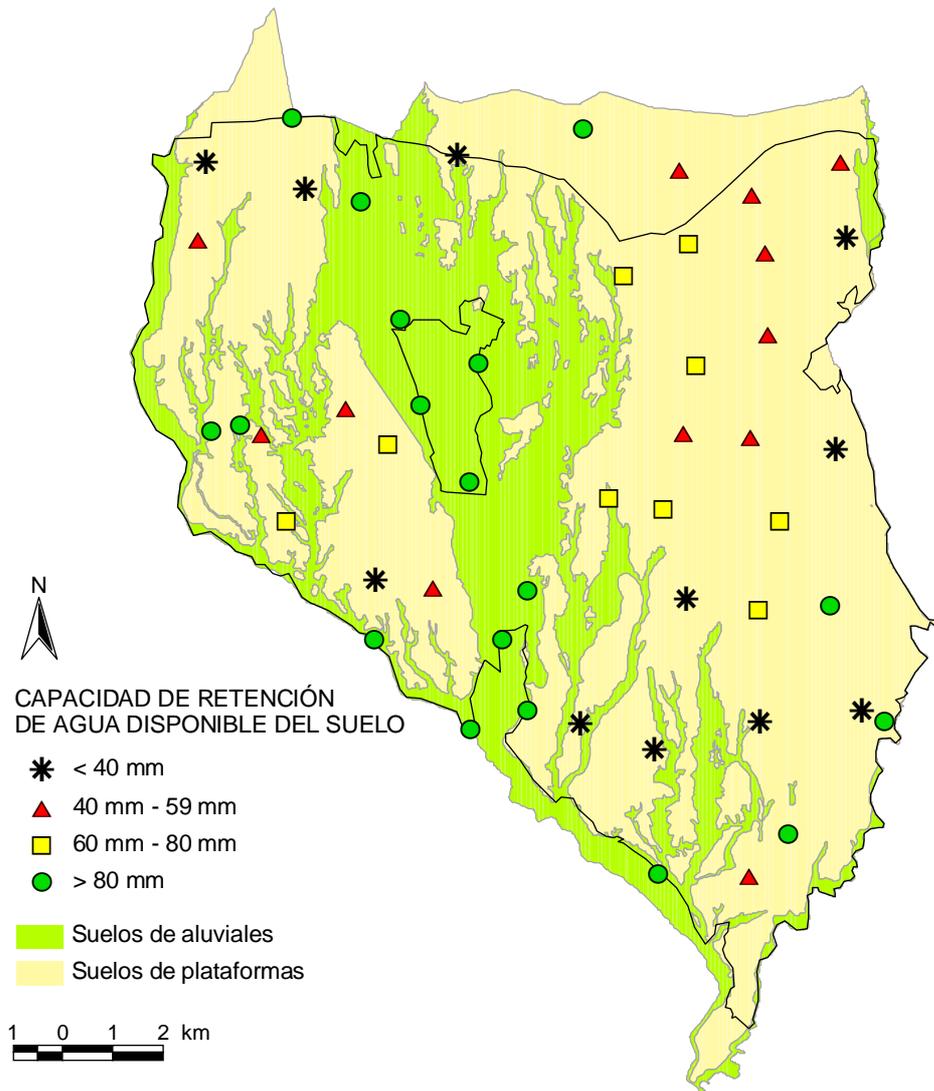
La Comunidad de Regantes V del Canal de Bardenas (CRV) es una comunidad representativa de las grandes zonas regables que se transformaron a mediados del siglo XX en España. Se sitúa en el valle del Ebro, al nordeste del país (Figura 3.1). Cuenta con una superficie regable de 15.545 ha que se riegan por superficie (salvo 450 ha que se riegan por aspersión) y pertenece a la Zona Regable del Canal de Bardenas. Este canal entró en servicio en 1959, tras la conclusión de las obras del embalse de Yesa en la cabecera del río Aragón (Bolea, 1986) y abastece actualmente a un total de 60.000 ha en las provincias de Zaragoza y Navarra.



**Figura 3.1** Localización y emplazamiento de la Comunidad de Regantes V del Canal de Bardenas (CRV)

La caracterización climática de la zona se realizó con los datos termopluviométricos del período 1965-1994 registrados en la Estación Meteorológica de Santa Anastasia, situada dentro de la propia comunidad (42° 07' 58", 1° 13' 27" W, 321 m de altura sobre el nivel del mar). Según dichos datos el área de estudio presenta un clima templado (temperatura media anual de 14 °C) con una importante oscilación térmica entre las estaciones de invierno y verano (la temperatura mínima media del mes más frío -enero- es de 1,7 °C, y la máxima media del mes más cálido -julio- es de 31,3 °C). La precipitación anual media es de 419 mm, que se reparten de forma desigual a lo largo del año, siendo mayores las precipitaciones de las estaciones de primavera (135,8 mm) y otoño (122,6 mm), existiendo un período seco entre el mes de julio y el de septiembre. La evapotranspiración de referencia media anual ( $ET_0$ ), calculada según la metodología de Hargreaves (Jensen et al., 1990), alcanza un valor de 1.084 mm. La mayor  $ET_0$  media mensual se produce en el mes de julio con 190,0 mm (6,1 mm día<sup>-1</sup>), y la menor en el mes de diciembre con 21,1 mm (0,7 mm día<sup>-1</sup>).

Según el mapa geomorfológico realizado por Basso (1994), y la información de suelos obtenida por el Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario (1974) y por Martínez Beltrán (1978), en la zona de estudio se distinguen dos grandes unidades geomorfológicas con dos tipos de suelo diferenciados. Una unidad estaría formada por plataformas residuales (localmente llamadas "sasos") asentadas sobre materiales terciarios (lutitas y areniscas principalmente). Sus suelos, *Calcixerollic Xerochrept* con inclusiones de *Petrocalcic Xerochrept* (Soil Survey Staff, 1992), se caracterizan por su escasa profundidad, la presencia de una costra calcárea con un grado de cementación variable, texturas francas con elevado contenido en elementos gruesos, y unas buenas condiciones de drenaje que permiten unos niveles de salinidad bajos. Esta unidad ocupa 11.054 ha, lo que equivale a un 71,1 % de la superficie de la CRV. La segunda unidad comprendería la superficie restante, 4.491 ha (28,9 %) y se correspondería con los fondos aluviales del río Riguel, que atraviesa la CRV de norte a sur, y sus barrancos. Sus suelos, *Typic Xerofluvent* (Soil Survey Staff, 1992), son profundos, con texturas franco arcillosas y con escasa presencia de elementos gruesos, apareciendo algún problema de salinidad en la parte más deprimida del valle del río. La Figura 3.2 muestra la distribución de cada una de estas unidades de suelos en la CRV.



**Figura 3.2** Localización y capacidad de retención de agua disponible de los perfiles de suelo estudiados en la CRV sobre una adaptación del mapa geomorfológico de la zona elaborado por Basso (1994) a escala 1:25.000

La CRV cuenta con un total de 891 propietarios que se reparten 1.698 parcelas, según la base de datos del año 2001 existente en las oficinas de la comunidad. La superficie media de dichas parcelas es de 11,5 ha, aunque únicamente el 28 % de las mismas presentan una superficie superior a la media. Un tercio de las explotaciones de regadío existentes en la CRV tienen un tamaño comprendido entre 10,0 y 15,0 ha, otro tercio de las explotaciones tendría un tamaño inferior a 10,0 ha, mientras que el resto superaría las 15,0 ha. El 60 % de estas explotaciones se encuentran divididas en dos o más parcelas repartidas en el dominio regable de la CRV.

Aunque la superficie ocupada por los distintos cultivos varía de un año a otro, el patrón de esta distribución es similar, siendo predominantes los cultivos extensivos, principalmente el maíz y la alfalfa. También existe una pequeña proporción de cultivos hortícolas, fundamentalmente tomate y pimiento. Según la base de datos disponible en la comunidad, en el año 2001 el maíz y la alfalfa ocuparon respectivamente un 40 y un 35 % de la superficie regable, los cereales de invierno un 6 %, el girasol un 5 %, las hortalizas un 3 % y otros cultivos (forrajeros principalmente) un 11 %.

Las infraestructuras de distribución de agua están compuestas por una red de acequias de hormigón que, partiendo del Canal de Bardenas, reparten el agua por gravedad entre los 11 sectores hidráulicos en los que se encuentra dividida la superficie de la CRV, según los datos de la propia comunidad. Para ello se dispone de ocho tomas en el Canal de Bardenas, con sus respectivas acequias principales, de las que parten 92 acequias secundarias que se ramifican para abastecer las diferentes parcelas, contando con una capacidad media de servicio de  $150 \text{ L s}^{-1}$ . En dichas acequias se construyeron en la década de 1990 una serie de aforadores de resalto de solera, como los descritos en Bos et al. (1984), que permiten cuantificar el volumen de agua suministrado, para lo cual se controla el número de horas que cada agricultor utiliza los caudales aforados para regar sus parcelas. En dichas parcelas el riego por escurrimiento con esorrentía libre es la técnica predominante de aplicación del agua. El riego por surcos está asociado a los cultivos hortícolas.

Los retornos de riego son evacuados a través de una red de drenaje que conduce el agua hacia 57 desagües principales, los cuales desembocan en nueve colectores. Dichos colectores delimitan los sectores hidráulicos de la CRV, y conducen las aguas de drenaje y de esorrentía hacia los ríos Riguel y Arba de Luesia, que sirven de colectores naturales de toda la zona regable.

Estas infraestructuras de riego fueron diseñadas en la primera mitad del siglo XX para proporcionar riegos de apoyo a los cultivos de cereal de invierno predominantes en aquella época (De los Ríos, 1966). Sin embargo, la evolución de la agricultura motivó en los años 70 un cambio a los cultivos de verano antes indicados. Esto supuso un drástico incremento de la demanda de agua (De los Ríos, 1984), lo que hizo imprescindible una jornada de riego de 24 h. A pesar de ello la red de distribución de agua no tiene capacidad suficiente para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos, existiendo unos intervalos entre riegos demasiado grandes durante los meses de máxima demanda. Ante esta situación

la CRV interconectó en diversos puntos la red de drenaje con la de distribución de agua para reducir dichos intervalos, los cuales se sitúan en la actualidad en torno a 12-14 días durante los meses de julio y agosto. En dos de esos puntos de interconexión existen sendas balsas, denominadas Moncayuelo y Bolaso, de 300.000 y 900.000 m<sup>3</sup> de capacidad respectivamente, que almacenan parte de los retornos de riego provenientes de la misma CRV y de otras comunidades situadas aguas arriba.

La gestión de la distribución de agua la realizan los seis guardas de riego que trabajan en la CRV. Durante las primeras y últimas semanas de la campaña, en las que la demanda de agua es menor, los agricultores realizan peticiones a dichos guardas, los cuales conceden el caudal de servicio de cada acequia durante un determinado período de tiempo negociado entre el regante y el guarda, existiendo una cierta flexibilidad en el reparto. Al llegar a los meses de máxima demanda, en los que la red no es capaz de transportar toda el agua que se requiere, se pasa a un sistema de reparto por turnos preestablecidos, asegurando así las mismas condiciones de acceso al agua a todos los agricultores. Según la clasificación de sistemas de reparto de agua de riego establecida por Clemmens (1987), el sistema usado en las épocas de baja demanda es negociado restringido, con caudal fijo. El sistema empleado en el pico de demanda es rotatorio, con frecuencia variable. Esta transición de sistemas de reparto durante la campaña de riego es habitual en muchas de las comunidades de regantes con riego por superficie en el valle del Ebro.

En las oficinas de la CRV, situadas en la localidad de Ejea de los Caballeros, se utiliza una base de datos para apoyar la gestión del agua, en la cual se relacionan para cada parcela, su propietario, la superficie de cada cultivo y la demanda de agua, entre otros datos. Mediante la misma se cobra a los agricultores de forma proporcional a la superficie regada, aunque a partir del año 2001 se estableció una tarifa binómica teniendo en cuenta los volúmenes de agua demandados. Este cambio de política tarifaria formó parte del Programa de Mejora de la Gestión emprendido por la CRV en 1996. Los trabajos que se describen a continuación representan una contribución adicional a este programa.

### 3.3 Material y métodos

#### 3.3.1 Estudio de los suelos

La determinación de las propiedades físicas de los suelos de la CRV se realizó mediante un muestreo llevado a cabo durante el invierno del año 2000. Su planteamiento tuvo en cuenta los estudios previos efectuados en la zona por Martínez Beltrán (1978) y Basso (1994). Se describieron 50 perfiles distribuidos por toda la superficie regable, por lo que atendiendo a la extensión de cada unidad geomorfológica se estudiaron 40 perfiles en plataformas y 10 en fondos aluviales. En las plataformas la descripción se realizó mediante la ejecución de calicatas con excavadora hidráulica de retroceso de 120 CV de potencia y anchura de cazo de 0,60 m. En los fondos aluviales se utilizó una barrena simple para llevar a cabo la descripción. La localización de cada uno de los perfiles se muestra en la Figura 3.2.

El estudio de los perfiles se realizó hasta una profundidad de 1,20 m o hasta encontrar una capa limitante. Se obtuvieron muestras de cada uno de los horizontes encontrados. La profundidad de cada uno de los horizontes, así como su textura, se obtuvieron *in situ*. La pedregosidad, la densidad aparente, la capacidad de campo y el punto de marchitez se obtuvieron en laboratorio a partir de las muestras de cada horizonte analizadas según determina el Soil Survey Laboratory (1996). En la determinación de los puntos característicos de humedad del suelo se realizaron dos repeticiones por cada muestra. La densidad aparente se determinó únicamente en cuatro perfiles a partir de una muestra inalterada de suelo, dada la dificultad de su obtención principalmente en suelos con abundancia de elementos gruesos. Las presiones utilizadas para capacidad de campo y punto de marchitez fueron de 33 kPa y 1.500 kPa, respectivamente (Soil Survey Division Staff, 1993).

Con los resultados obtenidos se determinó la capacidad de retención de agua disponible (*CRAD*, mm) en cada perfil (Porta et al., 1999), considerando un único valor medio de densidad aparente para cada uno de los dos tipos de suelo. Para el cálculo de la *CRAD* se utilizó la siguiente ecuación (Walker y Skogerboe, 1987):

$$CRAD = 10^3 \sum_{i=1}^{nh} z_i (\theta_{cc_i} - \theta_{pm_i}) \frac{\rho_{bi}}{\rho_w} (1 - p_i) \quad [3.1]$$

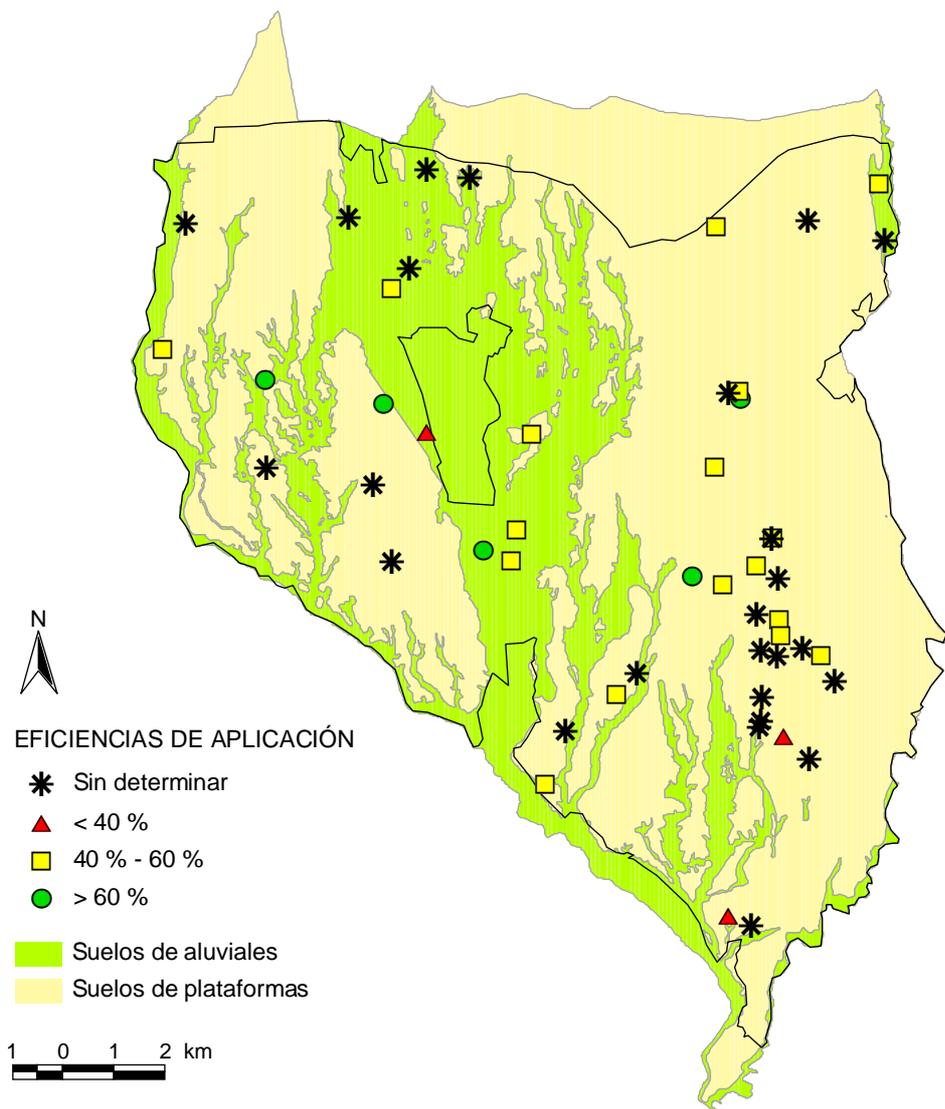
donde  $z_i$  es la profundidad del horizonte  $i$  del suelo (m),  $\theta_{cci}$  es el contenido gravimétrico de agua en el horizonte  $i$  del suelo a capacidad de campo ( $^{\circ}/_1$ ),  $\theta_{pmi}$  es el contenido gravimétrico de agua en el horizonte  $i$  del suelo en el punto de marchitez ( $^{\circ}/_1$ ),  $\rho_{bi}$  es la densidad aparente del suelo en el horizonte  $i$  ( $\text{Mg m}^{-3}$ ),  $\rho_w$  es la densidad del agua ( $\text{Mg m}^{-3}$ ),  $p_i$  es el contenido volumétrico de elementos gruesos del suelo en el horizonte  $i$  ( $^{\circ}/_1$ ), y  $nh$  es el número de horizontes del perfil del suelo hasta una profundidad de 1,20 m o hasta encontrar una capa limitante.

Para comprobar la fiabilidad de los resultados obtenidos en laboratorio de los puntos característicos de humedad, se determinó la humedad gravimétrica de 12 muestras adicionales de suelo según el Soil Survey Laboratory (1996). Las muestras se obtuvieron antes del riego y tras 48 h del mismo en 12 tablares situados en suelos de plataformas con cultivos de maíz y alfalfa.

A partir de la *CRAD* se estimó la dosis requerida ( $z_r$ , mm). Esta variable indica la cantidad de agua que se debe reponer en el suelo en el momento del riego para llevarlo a capacidad de campo (en el caso de no existir problemas de salinidad en el suelo que requiriesen además una dosis para el lavado). Para ello es preciso considerar que los cultivos extraen una fracción de la *CRAD* que se sitúa entre el 40 y el 75 % (Cuenca, 1989). El objetivo del riego en un determinado suelo será aplicar una dosis no superior a  $z_r$ , para evitar las pérdidas de agua por percolación profunda.

### 3.3.2 Evaluación del riego a escala de parcela

La realización de las evaluaciones de riego tuvo por objeto determinar los índices de calidad del riego en parcela y caracterizar la infiltración de los suelos. Durante los años 1999 y 2000 se realizaron un total de 50 evaluaciones distribuidas en la superficie regable de la CRV, de las que 38 se llevaron a cabo sobre suelos de plataformas. Para tener en cuenta la presencia de riego por surcos cinco de dichas evaluaciones se realizaron sobre parcelas con cultivos hortícolas. En todos los casos se siguió la metodología propuesta al efecto por Merriam y Keller (1978). La Figura 3.3 muestra la distribución espacial de las evaluaciones de riego.



**Figura 3.3** Localización y eficiencia de aplicación de las evaluaciones de riego realizadas en la CRV sobre una adaptación del mapa geomorfológico de la zona elaborado por Basso (1994) a escala 1:25.000

La elección de las parcelas a evaluar se realizó en función de su geometría y su nivelación. Se seleccionaron tablares rectangulares, con entrada de agua en uno de los lados cortos, y nivelados mediante láser. Durante las evaluaciones el agricultor realizó sus prácticas habituales de riego.

La medida de las dimensiones de los tablares se llevó a cabo mediante rueda métrica. La pendiente y la desviación estándar de la elevación se determinaron realizando mediciones sobre el eje longitudinal del tablar cada 10-30 m (según la longitud de éste) con un nivel topográfico. La obtención de estos dos parámetros se realizó mediante regresión simple de la elevación respecto de la distancia a lo largo del tablar.

El caudal de entrada de agua al tablar se midió con un minimolinete hidráulico y se controló el tiempo de riego. La fase de avance se midió a través de la toma de tiempos de llegada del agua a las estacas de referencia dispuestas a lo largo del tablar cada 10-30 m.

Poco antes de finalizar el riego se efectuaron medidas de calado de agua cada 3-4 m a lo largo de una línea perpendicular al flujo del agua a la altura de la primera estaca de referencia colocada en el tablar. Se consideró que el calado del flujo en este punto y tiempo es igual a la media de las medidas realizadas.

En cuatro tablares en los que las condiciones del desagüe lo permitieron se realizó la medida de la escorrentía del agua de riego. Para tal determinación se utilizó, según los casos, el minimolinete o un flotador, de tal manera que mediante medidas discretas del caudal se estableció un hidrograma a partir del cual se estimó el volumen de escorrentía.

Los parámetros de infiltración y de rugosidad hidráulica se obtuvieron mediante el uso de un modelo hidrodinámico unidimensional de simulación de riego por superficie (Walker, 1993). Dicho modelo se ejecutó con los datos de cada evaluación recogidos en campo, utilizando valores tentativos como parámetros  $k$  y  $a$  de la función de infiltración de Kostiakov (1932), y  $n$  de rugosidad de Manning. De esta manera, y mediante la ejecución iterativa del modelo se fueron ajustando tales parámetros hasta que los resultados de avance y calado de la simulación se aproximaron a los valores medidos en campo (Playán et al., 2000).

Una vez determinados estos parámetros de infiltración y rugosidad se obtuvieron los índices de calidad de riego para cada una de las evaluaciones (Burt et al. 1997). Estos índices fueron la eficiencia de aplicación ( $AE$ ) y la uniformidad de distribución del cuarto más bajo ( $DU_{1q}$ ). La  $AE$  expresa el porcentaje de agua aplicada durante un riego que contribuye a satisfacer la  $z_r$ . La  $DU_{1q}$  se define como la relación entre la dosis media de agua infiltrada en la cuarta parte del área

regada que ha recibido menos agua y la dosis media de agua infiltrada durante un riego.

Para la determinación de los índices de calidad se utilizó un modelo hidrodinámico unidimensional (Lecina et al., 2001), en el que mediante un coeficiente de calibración se ajustó la estimación del caudal de escorrentía a los resultados de las mediciones que de este caudal se realizaron en campo. De esta forma se consideró la constricción que supone al flujo de agua el desagüe del final del tablar, consistente generalmente en una o dos tuberías de hormigón de baja presión de 200-300 mm de diámetro.

### **3.3.3 Evaluación del riego a escala de comunidad**

#### **3.3.3.1 Aproximación basada en la simulación**

La información obtenida en los estudios de los suelos, y de las infraestructuras y organización de la comunidad, junto con los resultados de las evaluaciones de riego en parcela, permitieron evaluar la situación actual del riego a escala de comunidad, así como diferentes alternativas de mejora. La herramienta utilizada para realizar este trabajo fue un modelo hidrodinámico de simulación del riego por superficie con el que se reprodujo el riego en la comunidad (Lecina et al., 2001). A esta escala no se consideró el riego por surcos dada la escasa superficie ocupada por los cultivos hortícolas en la CRV.

Dada la imposibilidad de realizar tantas simulaciones como unidades de riego (tablares) existen en la CRV, se utilizaron unidades de riego tipo, representativas cada una de ellas de una área concreta de la comunidad con características similares frente al riego (Playán et al., 2000). En este trabajo, las áreas que se consideraron a tal efecto fueron las correspondientes a la superficie regada por un mismo módulo de riego cuando se establece el régimen rotacional de reparto de agua entre los agricultores. Estas áreas, denominadas por los gestores de la CRV “turnos”, abarcan un número variable de parcelas, pero siempre se riegan desde una misma acequia. En ocasiones, el área regada desde una de las acequias de la comunidad se divide en varios turnos respondiendo a las necesidades organizativas del riego rotacional. Se identificaron un total de 147 “turnos”, cuya representación cartográfica, realizada mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG), se obtuvo de combinar la cartografía catastral, la de la red de riego y drenaje, y los conocimientos de los guardas.

En cada “turno” se determinaron los parámetros medios necesarios para definir su unidad de riego tipo. Estos parámetros fueron, además del caudal del “turno”, la longitud y anchura medias de los tablares (medidas a partir de la restitución planimétrica de fotografías aéreas), la pendiente media de los tablares (obtenida por extrapolación de las medidas efectuadas en los tablares cuyo riego se evaluó), la dosis de riego requerida, y la infiltración media del suelo (determinada a partir de la agregación de los resultados obtenidos en las evaluaciones de riego en parcela). De esta forma se definieron las unidades de riego tipo representativas de cada uno de los “turnos” existentes en la comunidad, lo que permitió simular el riego en el conjunto de la CRV mediante el modelo hidrodinámico antes citado.

La reproducción del riego de la CRV en la situación actual se basó en los tiempos de corte determinados en las evaluaciones de riego. En todas ellas el tiempo de corte fue mayor que el necesario para satisfacer la dosis requerida. Para la unidad de riego tipo de cada “turno” se realizó una simulación con el fin de determinar el tiempo de corte óptimo. Este tiempo óptimo se definió como el tiempo mínimo de riego que aseguraba que en toda el área del tablar la dosis de agua aplicada alcanzaba al menos la dosis requerida. De igual manera se procedió con las evaluaciones de riego, obteniendo el ratio entre el tiempo de corte actual y óptimo para cada tipo de suelo. Con este ratio se estimó el tiempo de corte actual para cada “turno”.

En el caso de aquellos “turnos” en los que se encuentran los dos tipos de suelo caracterizados en la CRV se realizaron dos simulaciones de riego, una para cada suelo. Con los resultados obtenidos se realizó una media ponderada, de manera que el resultado reflejase la influencia de los dos suelos según la superficie que ocupen en el “turno”. La determinación de dicha superficie en cada uno de los “turnos” se llevó a cabo mediante las herramientas de análisis espacial del programa informático ArcView® de ESRI™.

Además de simular el riego a escala de comunidad en las condiciones actuales (Escenario 1), se evaluaron de la misma forma diversas alternativas de mejora del uso del agua aprovechando la capacidad de prospectiva del modelo de simulación. Se distinguieron dos escenarios de mejora (Escenario 2 y 3) según su actuación incida únicamente sobre la gestión o también sobre las infraestructuras. Estos escenarios fueron los siguientes:

- **Escenario 1:** reproduce las condiciones actuales de riego.

- **Escenario 2:** contempla una situación de mejora de la gestión del riego en parcela mediante la optimización del tiempo de corte. Con ello se asegura la satisfacción de la dosis de riego requerida ( $zr$ ) en toda la superficie de la unidad de riego con la menor aplicación de agua posible. Por tanto, en este escenario el valor de la eficiencia de aplicación se corresponde con el de la eficiencia potencial de aplicación ( $PAE$ ) según Burt et al. (1997).
- **Escenario 3:** representa una situación de mejora de las infraestructuras de la comunidad que permitiera utilizar un caudal del riego de  $200 \text{ L s}^{-1}$ . En este caso también se consideró la optimización del tiempo de riego con el mismo criterio que en el escenario anterior.

### 3.3.3.2 Aproximación hidrológica

Mediante la aproximación anteriormente descrita se extrapolaron a cada “turno” y al conjunto de la CRV los valores de eficiencia de aplicación obtenidos en la evaluación a escala de parcela. Sin embargo, para determinar una eficiencia global en la comunidad es necesario combinar la eficiencia de aplicación con la programación de riego, las necesidades hídricas de los cultivos, la eficiencia en la distribución del agua desde el canal hasta las parcelas, así como el efecto de la reutilización para el riego del agua de la red de drenaje.

La determinación de estos factores requiere la realización de unos trabajos cuyo nivel de precisión resulta inabordable para la escala a la que se ha desarrollado la presente investigación. No obstante, se ha llevado a cabo una aproximación hidrológica que permite estimar la eficiencia global del uso del agua en la comunidad.

Para ello se utilizó el índice de aprovechamiento ( $IAp$ ) de agua (Faci et al., 2000). Dicho índice representa el porcentaje de las necesidades hídricas netas de los cultivos en una campaña de riego respecto al volumen de agua facturado.

El índice de aprovechamiento es una simplificación del concepto de eficiencia de riego propuesto por Burt et al. (1997), la cual se define como el porcentaje de agua de riego aplicada que es aprovechada para satisfacer usos

beneficiosos, como la evapotranspiración de los cultivos, durante un determinado período de tiempo. Las diferencias entre los dos índices estriban en que los volúmenes de agua utilizados en el cálculo del *I<sub>Ap</sub>* no siempre coinciden con la realidad. La disminución de la evapotranspiración de los cultivos como consecuencia del estrés hídrico, o la inexactitud en la facturación del agua de riego pueden ser algunos de los motivos de estas discrepancias. El índice de aprovechamiento se ha utilizado hasta ahora aplicándolo a la parcela de riego. De esta manera se ha utilizado el agua facturada por la comunidad a los agricultores en cada cultivo y se ha establecido el valor del índice en cada parcela (Faci et al., 2000; Dechmi et al., 2003a). En este caso, el índice se aplicó al conjunto de la CRV, y por lo tanto se obtuvieron estimaciones de la eficiencia global de la comunidad.

Este índice fue calculado en la zona de estudio durante los años 2000 y 2001. Para ello se contó con los datos meteorológicos proporcionados por una estación agrometeorológica automática instalada al efecto en la comunidad (42° 10' 13", 1° 12' 50" W, 380 m de altura sobre el nivel del mar). Con dichos datos se calcularon las necesidades hídricas netas de los cultivos según Allen et al. (1998), considerando los coeficientes de cultivo propuestos para la zona por Martínez-Cob et al. (1998). Las superficies ocupadas por los diferentes cultivos fueron obtenidas de la base de datos existente en las oficinas de la CRV. El volumen de agua facturada por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) a la comunidad fue proporcionado por la propia CHE.

## **3.4 Resultados y discusión**

### **3.4.1 Estudio de los suelos**

En la Tabla 3.1 se presentan los resultados analíticos del muestreo de los suelos de la CRV. Los suelos de plataformas presentan una matriz de textura franca, con una densidad aparente de 1,52 t m<sup>-3</sup>. Sus principales características son su importante fracción de elementos gruesos (22 % de media) y su reducida profundidad (0,87 m de media). No obstante, existe una importante variabilidad espacial de este último parámetro como consecuencia de la existencia de horizontes formados por una costra caliza con distintos grados de dureza (Figura 3.4). El caso extremo se produce cuando dicha costra caliza se encuentra fuertemente cementada, conformando un horizonte petrocálcico denominado

localmente “mallacán”, y que puede llegar a limitar la profundidad efectiva del suelo hasta unos valores inferiores a 0,30 m.



**Figura 3.4** Perfil de los suelos de plataformas de la CRV con costra caliza escasamente cementada (izquierda) y fuertemente cementada formado un horizonte petrocálcico (derecha)

**Tabla 3.1** Resultados del muestreo de los suelos de la CRV (10 perfiles en suelos aluviales y 40 en suelos de plataformas)

		Aluviales	Plataformas
Profundidad efectiva, m	media	1,20	0,87
	mín.-máx.	>1,20	0,26-1,65
Elementos gruesos, % volumen	media	0	22
	mín.-máx.	0	4-53
CRAD, mm	media	182	60
	mín.-máx.	137-250	15-156

Como consecuencia de todo ello, la *CRAD* presenta unos valores muy variables que oscilan entre 15 mm, para zonas con presencia de un horizonte petrocálcico, y 156 mm, donde éste no existe, con una media de 60 mm para el conjunto de los perfiles estudiados. Con el nivel de detalle con el que se llevó a cabo el muestreo no se pudieron delimitar zonas con valores homogéneos de *CRAD* dentro de las plataformas, dada la errática distribución de los horizontes con presencia de costra caliza (Figura 3.2). Por ello la variabilidad espacial de la *CRAD* dentro de esta unidad de suelos no pudo ser cartografiada.

Los suelos de los fondos aluviales presentan por el contrario una profundidad mayor de 1,20 m en todos los sondeos efectuados. Su matriz es de textura franco arcillosa, con una densidad aparente de  $1,40 \text{ t m}^{-3}$ , sin que existiera presencia de elementos gruesos en ningún caso. La *CRAD* determinada a partir de estos datos alcanza unos valores altos, con una media de 182 mm.

Para la determinación de la dosis requerida a partir de datos hidrológicos se consideró una evapotranspiración media de los cultivos de 70-80 mm en un intervalo medio entre riegos de 12 días durante el mes de máxima demanda. Este valor es inferior a la *CRAD* en suelos aluviales, pero no así en los suelos de plataformas. En los suelos aluviales, el valor estimado de  $z_r$  se aproxima al 50 % de la *CRAD*, lo que constituye un nivel de extracción de agua que no afectaría al rendimiento de los cultivos. En el caso de las plataformas, el valor estimado de  $z_r$  supera incluso al de la *CRAD*, lo que supone un gran nivel de agotamiento de agua, que pone en duda la viabilidad de los cultivos sobre estos suelos. Esto es debido a que su demanda de agua en el período entre riegos es superior a la que el suelo puede almacenar y poner a disposición de las raíces. Sin embargo, la realidad es que los cultivos completan su ciclo vegetativo incluso en los suelos con menor *CRAD* dentro de las plataformas.

La razón de que esto suceda puede deberse a una combinación de factores. La existencia de flujos subsuperficiales de agua por encima del horizonte petrocálcico, la disminución de la evaporación del agua del suelo por el sombreado de las piedras, y una ligera disminución de la evapotranspiración al producirse estrés hídrico, pueden ser algunas de las causas que posibiliten el desarrollo de los cultivos con un aceptable nivel productivo. Del mismo modo, la incertidumbre en la determinación de los puntos característicos de humedad del suelo puede inducir a subestimar el valor de la *CRAD* en suelos de textura franca, como indican Gijsman et al. (2002).

Este último factor se constató con los resultados de la determinación de la humedad gravimétrica en muestras de suelo obtenidas antes y después del riego. Dichos resultados mostraron como la humedad gravimétrica tras el riego coincidió sensiblemente con la de capacidad de campo obtenida en laboratorio. Sin embargo, la humedad gravimétrica antes del riego se situó de media en el 90 % de la humedad del punto de marchitez. Esta extracción de agua del suelo por debajo del punto de marchitez (particularmente en los horizontes superficiales) se ha observado en otras experiencias con maíz y girasol (Cabelguenne y Debaeke, 1998), y se realizaría a costa de una cierta disminución de la producción. Asimismo, durante el intervalo de tiempo en el que el suelo pasa de saturación tras el riego a capacidad de campo, que en la práctica común se estima de una duración de 48 h, la planta está aprovechando parte del agua gravitacional que se considera perdida por percolación profunda.

Por todas estas razones se consideró finalmente una dosis requerida para los suelos de plataforma de 65 mm, mientras que en suelos aluviales se mantuvo en 80 mm.

### **3.4.2 Evaluación del riego a escala de parcela**

En la Tabla 3.2 se presentan los resultados agregados de las evaluaciones de riego, diferenciándose en tres grupos: las realizadas en tablares en suelos de fondos aluviales, las realizadas en tablares en suelos de plataformas, y las que se realizaron en riego por surcos (en este caso todas fueron en plataformas). Los cultivos existentes en las parcelas evaluadas fueron alfalfa, maíz y girasol, en el caso de tablares, y tomate y pimiento en el caso de surcos. Para obtener los parámetros de la función de infiltración y de la rugosidad, así como para determinar los índices de calidad del riego y el resto de variables, se seleccionaron aquellas evaluaciones en las que no se produjeron incidencias que desvirtuasen los resultados, y en las que las condiciones iniciales de humedad del suelo se consideraron normales.

**Tabla 3.2** Resultados de las evaluaciones de riego realizadas en la CRV

		Aluviales	Plataformas	Surcos
Superficie, m <sup>2</sup>	media	8.900	10.733	10.089
	CV	47,69	31,83	3,76
	muestras	11	33	5
Pendiente, ‰	media	0,88	1,94	1,32
	CV	82,10	88,91	31,72
	muestras	11	31	5
Desviación Estándar de la Elevación, cm	media	1,8	1,5	1,1
	CV	60,69	46,75	24,31
	muestras	11	33	5
Caudal, L s <sup>-1</sup>	media	103	136	108
	CV	35,13	40,29	24,46
	muestras	11	33	5
Tiempo de riego, h ha <sup>-1</sup>	media	2,99	2,87	3,17
	CV	27,51	40,62	30,52
	muestras	11	33	5
Dosis de riego, mm	media	106	128	139
	CV	35,27	32,21	35,81
	muestras	11	33	5
Coeficiente <i>n</i> de rugosidad de Manning, -	media	0,29	0,19	0,06
	CV	36,40	29,98	16,64
	muestras	6	17	3
Coeficiente <i>k</i> de la función de infiltración de Kostiakov, m min <sup>-a</sup>	media	0,0148	0,0095	0,0090
	CV	49,58	27,75	10,10
	muestras	6	17	3
Coeficiente <i>a</i> de la función de infiltración de Kostiakov, -	media	0,31	0,44	0,45
	CV	17,15	10,36	13,70
	muestras	6	17	3
Eficiencia de aplicación, %	media	61,8	52,9	34,7
	CV	16,98	16,54	15,19
	muestras	6	17	3
Uniformidad de distribución en el cuarto más bajo, %	media	84,2	85,9	85,7
	CV	8,32	8,08	2,59
	muestras	6	17	3

El tamaño de los tablares se sitúa en torno a una hectárea, con una variabilidad moderada, y siendo ligeramente mayor en plataformas que en aluviales. La pendiente es un parámetro con un amplio rango de variación. De media, es superior en plataformas (1,94 ‰ frente al 0,88 ‰ en aluviales), mientras que los surcos presentan un pendiente intermedia (1,32 ‰). Estos datos parecen indicar que los agricultores, en sus modificaciones de la pendiente de las parcelas, han tenido en cuenta las características de infiltración de los suelos. Así, han dotado de mayor pendiente a aquellas parcelas que infiltran más rápidamente el agua. En el caso de los surcos en plataformas, los agricultores actúan considerando la necesidad de humectar adecuadamente los caballones, lo cual requiere un flujo de agua más lento y un mayor calado. Esto justificaría una pendiente más suave. La desviación estándar de la elevación osciló entre uno y cuatro centímetros. El valor promedio se sitúa entre 1,06 cm para los surcos y 1,77 cm para los tablares en suelos aluviales. Estas cifras indican que la nivelación láser se realiza con frecuencia en la CRV, lo que favorece la práctica del riego por superficie (Playán et al., 1996).

Los caudales utilizados en el riego presentan una gran variabilidad en función de las condiciones de las acequias, aunque en promedio son superiores a  $100 \text{ L s}^{-1}$ . Dichos caudales son más elevados en tablares de plataformas ( $136 \text{ L s}^{-1}$ ), que en surcos y en aluviales ( $108$  y  $103 \text{ L s}^{-1}$  respectivamente). La necesidad de conseguir un flujo de agua más rápido en suelos con mayor capacidad de infiltración explica este hecho. En surcos, los agricultores utilizan menores caudales cuando las plantas están ya desarrolladas, para evitar así que el agua llegue hasta la parte aérea de la planta y al fruto.

Los tiempos de riego, aunque también variables en función de los caudales utilizados, se sitúan de media en torno a tres horas por hectárea tanto en plataformas como en aluviales. Esta similitud en los dos tipos de suelo es indicativa de la influencia que sobre el riego tiene el manejo del agua por parte de los agricultores. En efecto, mediante la aplicación de caudales más elevados y la nivelación con mayores pendientes éstos consiguen que el riego en suelos con elevada tasa de infiltración no se prolongue en demasía, lo cual provocaría mayores pérdidas de agua y turnos de riego más largos. Por el contrario, en surcos el tiempo de riego es ligeramente superior ( $3,2 \text{ h ha}^{-1}$  de media), debido a los menores caudales utilizados y a la práctica realizada por los agricultores de humectar generosamente los caballones.

Con estos valores de caudal y tiempo de riego se aplican dosis de riego elevadas, siendo de media de 117 mm en aluviales, 120 mm en plataformas y 143 mm en el caso de surcos. A pesar de lo elevado de estas cifras, no se trata de valores infrecuentes en algunos sistemas de riego por superficie en el valle del Ebro (Playán et al., 2000; Zapata et al., 2000).

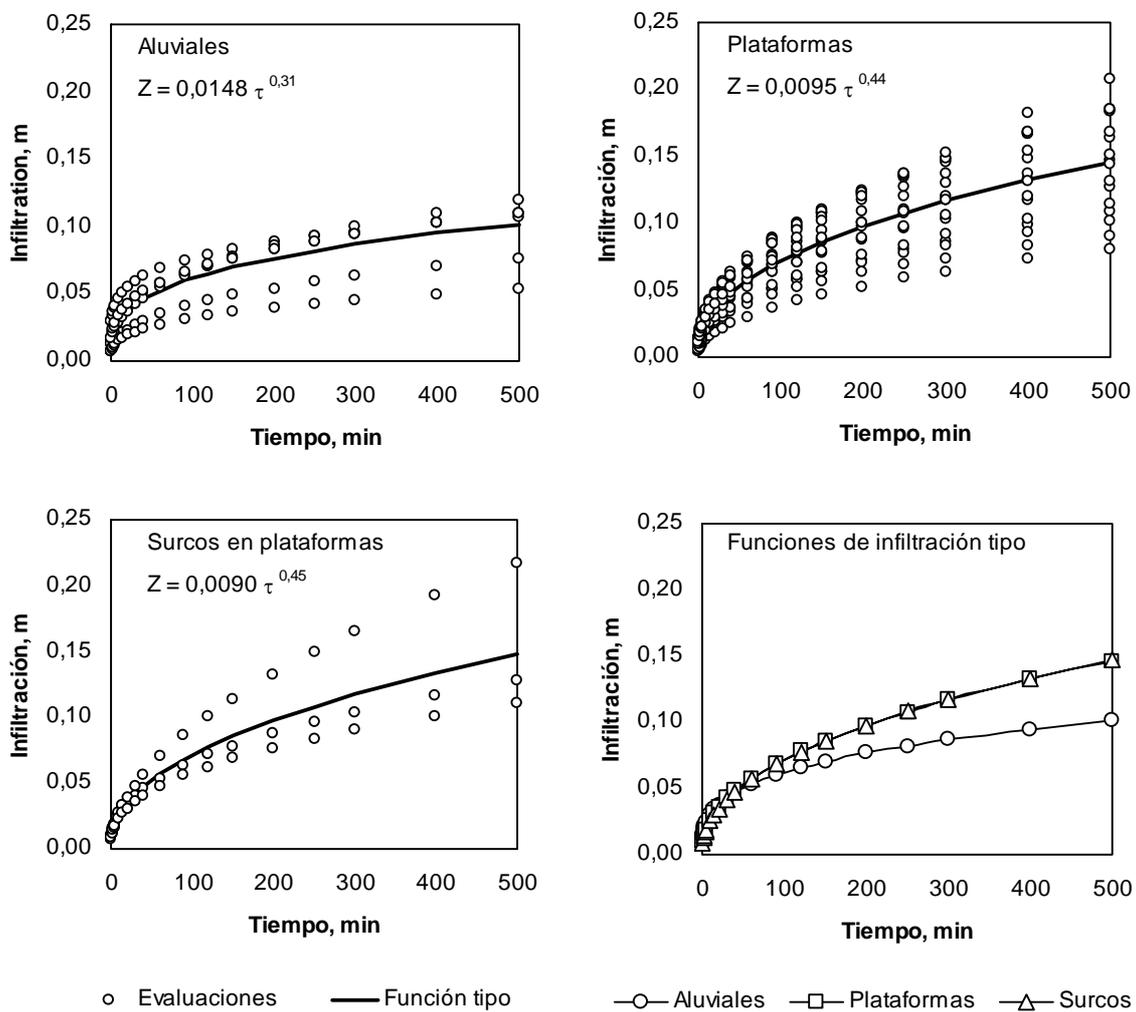
La rugosidad, representada por el valor de la  $n$  de Manning, osciló entre 0,11 y 0,31 en alfalfa, 0,08 y 0,18 en maíz y girasol, y 0,05 y 0,07 en pimiento y tomate en surcos. Las variaciones dentro de un mismo cultivo se debieron a las diferentes alturas cuando se realizaron las evaluaciones, además de a la presencia de diferentes proporciones de pedregosidad en superficie en función del tipo de suelo.

En la Figura 3.5 se presentan las funciones de infiltración obtenidas en las evaluaciones en las que no se produjeron incidencias que desvirtuasen los resultados obtenidos. La representación gráfica de dichas funciones se ha agrupado según el tipo de suelo y distinguiendo asimismo, en el caso de las plataformas, las evaluaciones de riego por surcos. A partir de dichas funciones, y de las características de los suelos, se estimaron tres clases de infiltración que posteriormente se aplicaron en el trabajo realizado a escala de comunidad. El amplio rango de variación de las funciones de infiltración obtenidas en cada evaluación dentro de cada tipo de suelos es debido a la gran variabilidad espacial de este parámetro físico, principalmente en los suelos de plataformas.

La infiltración en suelos de plataforma es superior a la de los suelos aluviales como consecuencia de su textura más gruesa y de su elevado contenido en elementos gruesos. No obstante, dicha infiltración no es tan elevada como en otros suelos de plataformas del valle del Ebro, en los que la textura de la matriz es más arenosa (Playán et al., 2000). Las diferencias en la infiltración entre el riego en tablares y en surcos dentro de las plataformas, aunque mínima, se deben a las características geométricas propias de los surcos y al calado que alcanza el agua en los mismos.

La eficiencia de aplicación alcanzó un valor medio del 53 % en plataformas, repartiéndose uniformemente los valores de cada tablar en el intervalo entre el 40 y el 75 %. Estos niveles de eficiencia para los suelos de plataformas podrían haber sido más bajos de no aplicarse los caudales y pendientes de tablares antes indicados. La menor infiltración observada en los suelos de estas plataformas respecto a los de otras zonas similares del valle del

Ebro también ha influido en este sentido. Por el contrario, los surcos se quedaron en una eficiencia que varió entre el 27 y el 39 % (con una media del 35%), como consecuencia de los menores caudales y pendientes utilizados, y de que el espaciamiento entre surcos es de 0,6 m de media. En aluviales la eficiencia de aplicación media fue del 62 %, con un rango de variación entre el 51 y el 81 %. Estos valores de AE alcanzados en suelos aluviales, aunque también bajos, ponen de manifiesto las mejores aptitudes de este tipo de suelos para el riego por superficie. En la Figura 3.3 se muestra la distribución espacial de las eficiencias de aplicación obtenidas en las evaluaciones de riego en parcela.



**Figura 3.5** Funciones de infiltración obtenidas en tablares sobre suelos aluviales y de plataformas, y en surcos sobre suelos de plataformas de la CRV

La uniformidad de distribución del cuarto más bajo fue elevada, superándose en todos los casos el 62 %. La  $DU_{iq}$  media en las plataformas (tanto en tablares como en surcos) alcanzó un 86 %, mientras que en aluviales fue del 84 %. La provisión de desagüe de las parcelas contribuyó positivamente en la consecución de estos buenos valores de uniformidad.

Para la determinación de estos índices de calidad se multiplicó el caudal de desagüe del modelo (basado en la hipótesis de caudal uniforme de escorrentía en toda la anchura del tablar) por un coeficiente corrector con valor de 0,03. De esta forma se consiguió ajustar el volumen de escorrentía simulado por el modelo al volumen medido en campo durante las evaluaciones de riego en las que se pudo llevar a cabo dicha medición. Tal ajuste supone reducir a la mitad el volumen de escorrentía respecto a las simulaciones sin calibrar, teniendo en cuenta así la constricción del flujo del agua a la salida del tablar.

La utilización de este factor ha puesto de manifiesto la influencia que la constricción del flujo tiene sobre los índices de calidad obtenidos. Al minorar el caudal de escorrentía la  $DU_{iq}$  disminuye un 8 % como consecuencia de la mayor infiltración que se produce al final de los tablares, mientras que la  $AE$  apenas varía, dado que las dosis aplicadas son sensiblemente mayores a la  $z_r$ . Esto supone que el volumen total de pérdidas se mantenga en ambas situaciones. Sin embargo, la proporción de pérdidas por percolación resulta superior en caso de constreñirse la salida de agua, con las consiguientes consecuencias sobre la calidad de las aguas de retorno.

En una superficie en torno al 10 % de las plataformas no se realizaron evaluaciones dado que las parcelas no se encuentran abancladas ni niveladas. Este hecho permite pensar que en dichas zonas los valores de eficiencias y uniformidades son sensiblemente inferiores a los determinados en el resto de plataformas.

### **3.4.3 Evaluación del riego a escala de comunidad**

#### **3.4.3.1 Aproximación basada en la simulación**

El análisis de la cartografía y la caracterización de las redes de distribución de agua y los tablares de la comunidad indicó que el caudal medio de riego es de  $152 \text{ L s}^{-1}$ , con una oscilación entre  $100$  y  $350 \text{ L s}^{-1}$  entre los diferentes “turnos”,

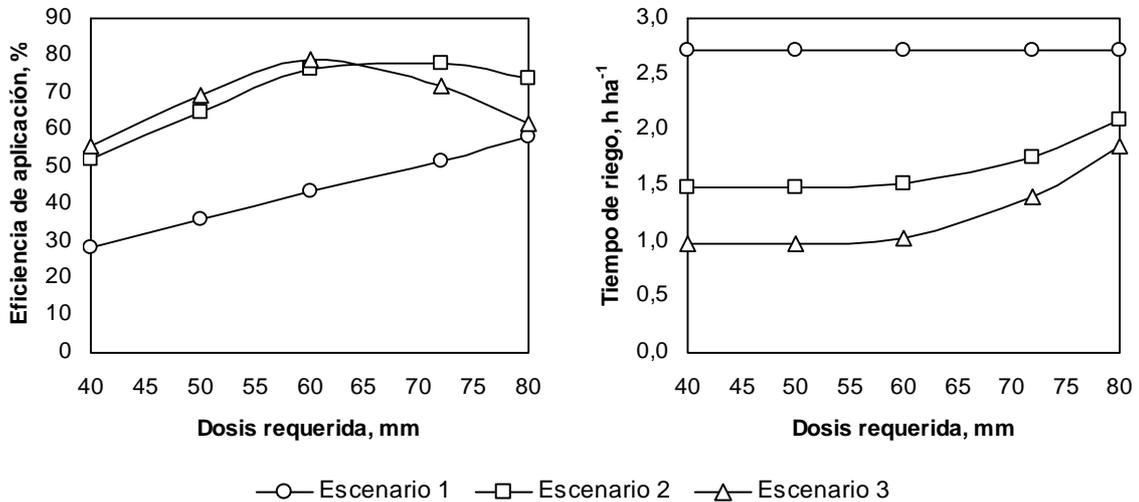
en consonancia con lo observado en las evaluaciones de campo. En cuanto a las dimensiones de los tablares, la longitud media de los mismos resultó ser de 241 m, contando con una superficie media de 9.644 m<sup>2</sup>.

Respecto al estudio de las alternativas de mejora, en primer lugar se analizó la influencia del suelo sobre la calidad del riego para cada uno de los tres escenarios planteados. Para ello se tomaron las características medias de cada uno de los “turnos”, diferenciándose los dos grandes tipos de suelo de la comunidad mediante la utilización de las dos funciones de infiltración y las dos dosis requeridas determinadas en el estudio de los suelos. En el caso de los suelos de plataforma, dada la gran variabilidad espacial de la *CRAD* de los mismos (directamente relacionada con la profundidad de estos suelos), se consideraron diferentes dosis requeridas. Así, se estudió la respuesta de la eficiencia de aplicación y el tiempo de riego a una dosis requerida comprendida entre 40 mm (suelos de plataforma con un horizonte petrocálcico a unos 40-50 cm de la superficie) y 80 mm (suelos de plataformas con profundidades próximas a 100 cm). De esta forma se tuvo en cuenta la incertidumbre de esta variable.

En la Figura 3.6 se muestra para los suelos de plataforma la evolución de la eficiencia de aplicación y el tiempo de riego en función de la dosis requerida para cada uno de los escenarios estudiados. Se observa como la eficiencia de aplicación varía linealmente entre un 30 (zr de 40 mm) y un 60 % (zr de 80 mm) en la situación actual (Escenario 1), siendo el tiempo de riego de casi tres horas por hectárea.

Respecto a los escenarios de mejora (Escenarios 2 y 3), el tiempo de riego oscila entre una y poco más de dos horas por hectárea, mientras que la *AE* varía entre un 50 y un 80 %, aunque en este caso la respuesta a la dosis requerida no es lineal. En efecto, puede observarse como en ambos escenarios la *AE* crece linealmente hasta un máximo del 80 %, que se alcanza con una dosis requerida de 60-65 mm. Esto es así porque el tiempo de riego permanece invariable con la dosis, dado que dicho tiempo es el mínimo necesario para que el agua llegue al final del tablar. A partir de dichos 60-65 mm es necesario aplicar mayor cantidad de agua al tablar para satisfacer una mayor dosis, lo que requiere aumentar el tiempo de riego. Sin embargo, dadas las características de infiltración del suelo y la escorrentía de los tablares, una parte importante del incremento de agua que es necesario aplicar se pierde irremisiblemente por percolación profunda y por escorrentía, por lo que la *AE* disminuye. Por tanto, y bajo las condiciones medias de caudal y dimensiones de tablar antes descritas, la dosis de 60-65 mm

sería la cantidad mínima de agua que se aplicaría a cualquier punto de un tablar asegurando que el agua llega al final del mismo.



**Figura 3.6** Eficiencias de aplicación y tiempos de riego medios en los suelos de plataformas en función de la dosis de agua requerida para los tres escenarios simulados en la CRV

Asimismo, puede comprobarse como las diferencias en la respuesta de la AE en las dos alternativas de mejora son escasas. En efecto, su evolución con la dosis requerida es paralela y muy similar hasta llegar a los 60-65 mm. Sin embargo, a partir de este límite sus trayectorias se separan como consecuencia de la mayor velocidad que adquiere el agua en el caso de aplicar caudales de  $200 \text{ L s}^{-1}$ . Este hecho provoca que el incremento de tiempo de riego sea más acusado en el Escenario 3 que en el 2 para asegurar la dosis de riego mínima, por lo que la aplicación de agua también es mayor, y por lo tanto también lo son las pérdidas.

Por otra parte, comparando la situación actual (Escenario 1) con los dos escenarios de mejora (2 y 3) se observan diferencias muy importantes en cuanto a las eficiencias de aplicación alcanzadas. Estas diferencias son mayores con las dosis de riego más pequeñas, siendo consecuencia de los mayores tiempos de riego que se están aplicando en la actualidad en comparación con los tiempos necesarios con las mismas condiciones de caudal (Escenario 2). Así, el tiempo de riego optimizado es un 55 % del tiempo de riego actual con dosis requeridas de hasta 60-65 mm. Este resultado se obtiene a pesar de adoptarse una postura conservadora en la optimización de los riegos, al haber efectuado el corte del agua

en el momento en el que la dosis mínima de riego en cualquier punto del tablar es mayor o igual a la dosis requerida. Para dosis mayores de 65 mm este porcentaje se eleva hasta un 78 % ( $z_r$  de 80 mm). Estas diferencias de tiempo son de gran importancia para el conjunto de la comunidad, dada su influencia sobre la duración del intervalo entre riegos (duración del “turno” que se aplica durante el periodo de riego rotatorio).

En las simulaciones sobre suelos aluviales, para la situación actual (Escenario 1) se consideró la  $z_r$  antes indicada de 80 mm. Sin embargo, en el Escenario 2 se contempló una  $z_r$  de 72 mm. Esta reducción se realizó considerando que la optimización del tiempo de riego, a diferencia de lo que ocurre en suelos de plataformas, permite reducir la dosis mínima de agua aplicada al tablar, por lo que también permite reducir el intervalo entre riegos.

La AE media alcanzada en la simulación del Escenario 1 es del 52 %. Las perspectivas son mucho más favorables con el Escenario 2, ya que se llegaría a una AE en torno al 80 %. Asimismo, el tiempo de corte optimizado sería un 58 % del actual, lo que podría suponer una reducción de la jornada diaria de riego y del intervalo entre riegos.

En aluviales no se ha realizado la simulación del Escenario 3 dado que la utilización de mayores caudales en este tipo de suelo no permite obtener unos resultados mejores que los conseguidos en el Escenario 2.

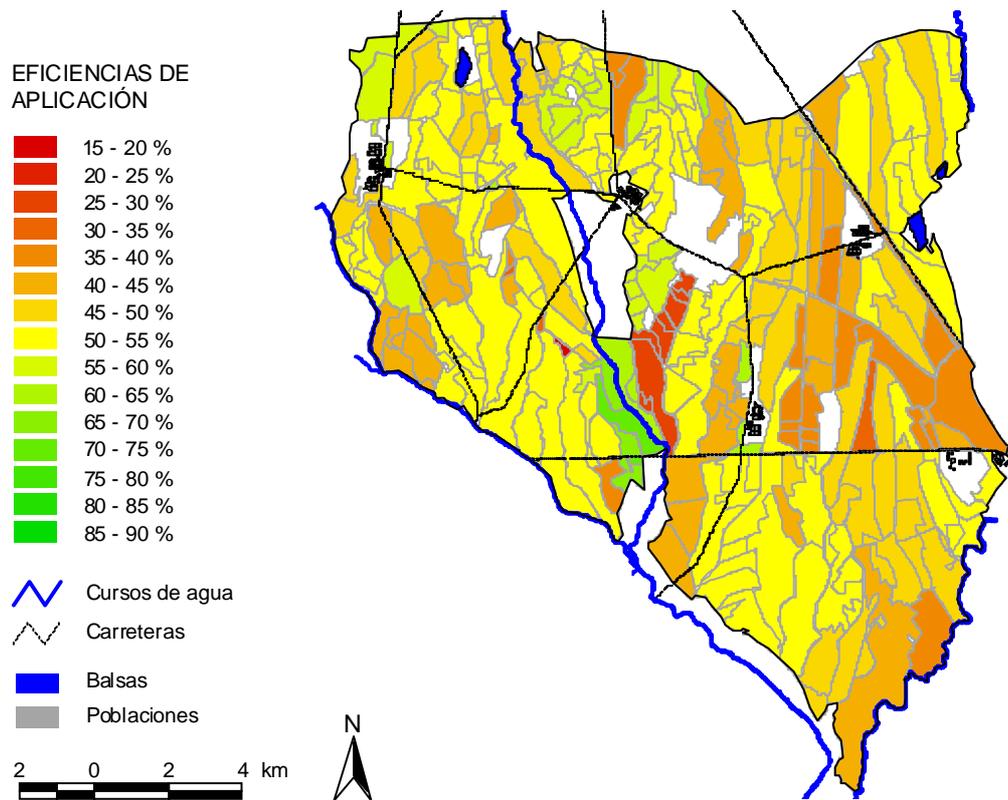
Una vez analizada la influencia de los dos tipos de suelo sobre la calidad del riego en la CRV, se determinaron los resultados medios del total de la comunidad para los tres escenarios simulados (Tabla 3.3). En cada alternativa se han simulado tres casos para tener en cuenta la variabilidad de la  $z_r$  en las plataformas. En el primero se ha considerado una dosis objetivo en plataformas de 40 mm (el valor mínimo en estos suelos), en el segundo de 72 mm (que se aproximaría a las necesidades de agua de los cultivos durante el intervalo entre riegos) y en el tercero de 65 mm (que representaría una dosis requerida media para las plataformas de la comunidad). La distribución espacial de estos resultados se puede observar en las Figuras 3.7 y 3.8, considerando una  $z_r$  en plataformas de 65 mm. También se han realizado otras figuras, no presentadas en esta Tesis, en las que se representan los resultados obtenidos para diferentes  $z_r$  en plataformas. De esta forma se ha pretendido que los agricultores de la CRV puedan particularizar los resultados obtenidos en función de las características del suelo de sus propias parcelas.

**Tabla 3.3** Valores medios y extremos de las eficiencias (de aplicación en el Escenario 1 y potencial de aplicación en el resto) y tiempos de riego de los distintos "turnos" de la CRV para los escenarios simulados considerando distintas dosis requeridas en plataformas ( $zr_{plataf.}$ ) y en aluviales ( $zr_{aluv.}$ )

Escenarios	$zr_{plataf}$ mm	$zr_{aluv}$ mm	Eficiencia de aplicación, %			Tiempo de riego, h ha <sup>-1</sup>		
			Media	Máx.	Mín.	Media	Máx.	Mín.
Escenario 1	40	80	35,3	64,7	19,7	2,83	4,43	1,07
	65	80	49,3	70,4	19,1	2,78	6,27	1,27
	72	80	51,9	71,4	24,0	2,79	5,52	1,42
Escenario 2	40	72	60,4	86,7	36,0	1,55	2,68	0,57
	65	72	76,3	87,0	29,7	1,72	4,05	0,80
	72	72	79,2	87,0	36,5	1,74	3,64	0,93
Escenario 3	40	72	62,9	86,7	33,4	1,18	2,11	0,76
	65	72	78,3	88,0	23,7	1,32	3,80	1,01
	72	72	75,1	86,9	34,0	1,48	2,92	1,11

Los resultados obtenidos se mantienen en la línea de lo ya descrito para las simulaciones realizadas, distinguiendo los dos tipos de suelos existentes en la comunidad. Así, resulta patente la influencia de la  $zr$  de los suelos de plataformas sobre las eficiencias de aplicación y los tiempos de riego, dada la mayor superficie que ocupan éstos en la CRV.

De este modo, a escala de comunidad el mejor escenario sería el correspondiente a la optimización de la duración del riego, pues permitiría alcanzar una eficiencia de aplicación del 76 % con unos tiempos de riego inferiores a dos horas por hectárea (1,72 h ha<sup>-1</sup>). El Escenario 3 (incremento del caudal de riego hasta 200 L s<sup>-1</sup>) no conseguiría superar esta eficiencia de forma relevante, dado que los caudales aplicados en la actualidad ya son elevados. Sin embargo, el uso de este caudal supondría una disminución del tiempo de riego que pudiera resultar interesante para reducir el intervalo entre riegos (hasta dosis de 60-65 mm el tiempo de riego optimizado con este caudal sería un 35 % del tiempo de corte actual). No obstante, el importante coste económico que supondría esta solución tampoco justificaría la adopción de la misma, salvo en zonas puntuales donde los caudales utilizados actualmente son muy inferiores a la media.

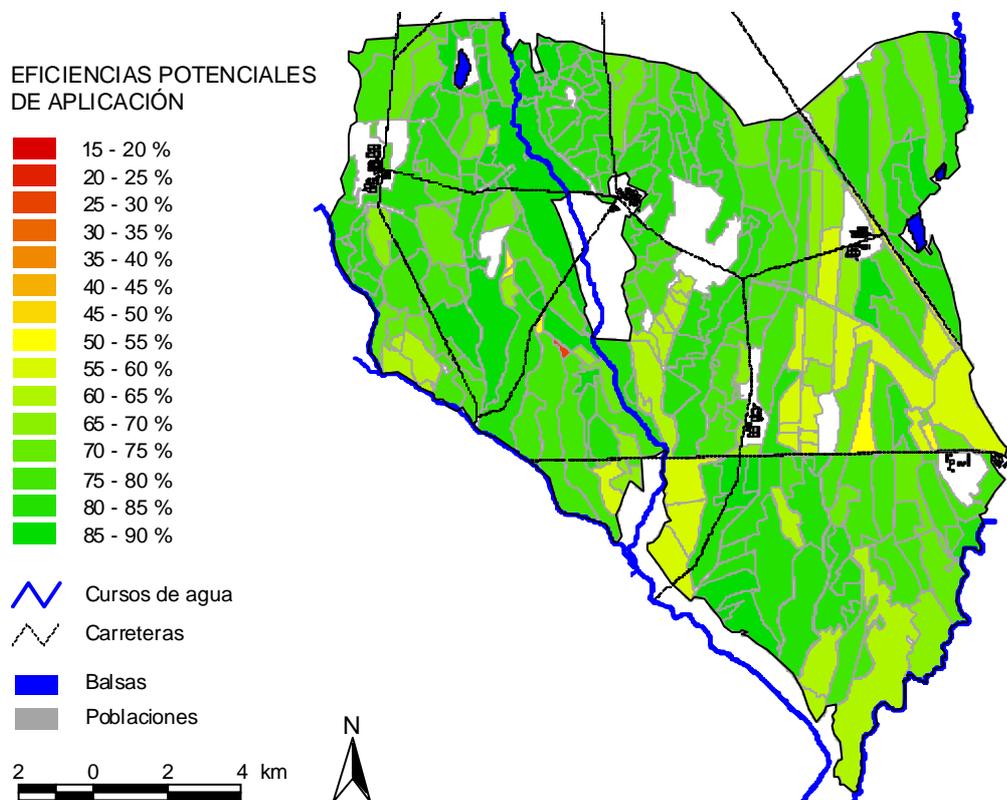


**Figura 3.7** Mapa de eficiencias de aplicación en parcela en la CRV para la situación actual (Escenario 1), considerando una dosis requerida en plataformas de 65 mm

Con estos resultados se evidencia la tendencia que tienen los agricultores a aplicar una cantidad de agua superior a la realmente necesaria con el objetivo de asegurar que todo el tablar quede perfectamente regado. La diferencia de agua aplicada entre el riego con una duración óptima y el riego con la duración actual no es realmente aprovechada por los cultivos (de la propia parcela), prolongándose sin necesidad el intervalo entre riegos, con las consecuencias que esto supone para el reparto de agua en la comunidad.

En este sentido, la aplicación de los resultados obtenidos en el Escenario 2 permitiría reducir la cantidad total de agua por tablar, realizando aplicaciones más frecuentes y eficientes, lo cual redundaría en un mejor aprovechamiento del agua por los cultivos, y por tanto, en unas mejores producciones. Sin embargo, la

reducción del tiempo de riego en las magnitudes antes indicadas conllevaría la necesidad de realizar el corte del agua con mayor rigor por parte de los agricultores. Esta pretensión se encontraría con problemas motivados por la estructura productiva de las explotaciones y las propias limitaciones de la red de distribución de agua. En efecto, la dispersión en la gran extensión de la comunidad de las parcelas de un mismo propietario provoca la realización de desplazamientos importantes para atender las labores del riego, lo que conlleva una menor precisión en el control del tiempo de aplicación del agua en los meses de mayor demanda. Por otra parte, la jornada de riego de 24 horas tampoco facilita estas labores cuando los riegos se realizan durante las horas nocturnas.



**Figura 3.8** Mapa de eficiencias potenciales de aplicación en parcela en la CRV para el Escenario 2 (optimización del tiempo de corte), considerando una dosis requerida en plataformas de 65 mm

La construcción de pequeñas balsas de regulación -con capacidad para almacenar el agua durante la noche- permitiría reducir la jornada de riego de manera que ésta coincidiera con las horas diurnas. Este tipo de obras, junto con la utilización de dispositivos de control del avance del agua en el tablar con tecnología GSM (*Global System for Mobile Communications*) incorporada, mejorarían de forma notable la actual situación. Esto es así porque no sólo se conseguirían unas mejores eficiencias de riego y unas mejores producciones, como ya se ha indicado, sino también porque se obtendría una considerable mejora de las condiciones de trabajo de los regantes, haciendo a su vez más atractivo el trabajo en la agricultura para las nuevas generaciones.

Por otra parte, la aplicación de una tarifa binómica también va a tener un efecto positivo sobre el uso del agua (hasta el año 2000 se ha pagado únicamente por superficie). Dicha tarifa no va a significar un incremento del precio medio que los agricultores tienen que pagar por el agua, sino la penalización de aquellas actuaciones que impliquen un gasto injustificado, y por lo tanto, un mayor tiempo de riego y una mayor duración de los “turnos” que repercute de forma negativa en todos los usuarios.

### 3.4.3.2 Aproximación hidrológica

La posibilidad de alcanzar unas mejores eficiencias de riego a través de una mejora de la gestión del riego se puede comprobar mediante el análisis del índice de aprovechamiento global de la comunidad. En el mismo están incluidos tanto el efecto de la eficiencia de aplicación en parcela, como el efecto de la gestión de la red, en la que existen tanto pérdidas en colas de acequias como reutilizaciones de aguas de desagüe por medio de trasvases.

En la Tabla 3.4 se muestran los índices de aprovechamiento globales de los años 2000 y 2001. En el año 2000 la disponibilidad de agua para la comunidad fue elevada, y las necesidades de agua de riego relativamente bajas. Ante esta perspectiva los agricultores aparentemente no fueron muy rigurosos al cortar el agua durante el riego, y las pérdidas de cola de las acequias se equipararon al volumen de agua reutilizado, ya que el *IAp* (48,7 %) fue similar a la eficiencia de aplicación en parcela. Por el contrario, en 2001 se produjeron restricciones de agua a partir del mes de julio debido a la escasez de precipitaciones durante la campaña de riego. Este hecho parece haber motivado una optimización de la gestión del agua, tanto en parcela como en distribución,

que provocó que el sistema fuese más eficiente (el *I<sub>Ap</sub>* alcanzó un valor del 66,3 %). Puesto que los agricultores no apreciaron un descenso en el rendimiento de los cultivos, estaríamos ante un ejemplo de la importancia de transmitir a los regantes la necesidad de reducir los tiempos de operación del riego.

**Tabla 3.4** Índices de aprovechamiento (*I<sub>Ap</sub>*) de la CRV calculados como la relación entre las necesidades hídricas netas de los cultivos (*NH<sub>n</sub>*) y el agua facturada por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) para las campañas de riego de 2000 y 2001

Año	<i>NH<sub>n</sub></i> hm <sup>3</sup>	CHE hm <sup>3</sup>	<i>I<sub>Ap</sub></i> %
2000	82,6	169,6	48,7
2001	97,4	146,8	66,3

A pesar de la importancia de la gestión del agua de riego en la CRV, la escasa capacidad de retención de agua de los suelos de plataforma hace recomendable su transformación a riego por aspersión o por goteo. Con dicha transformación, además de reducir de forma drástica la mano de obra necesaria para las operaciones de riego, se mejoraría notablemente el suministro de agua a los cultivos en este tipo de suelos, al poder regar más frecuentemente, lo cual redundaría en un incremento de las producciones.

No obstante, la vocación que por el riego por superficie existe en la zona hace recomendable adoptar las medidas para la mejora de la gestión descrita, a la vez que se acometen pequeños proyectos de impulsión que vayan promoviendo la transformación paulatina en riego a presión. Una experiencia de este tipo ya se ha comenzado a aplicar en 2002 en la comunidad tras la transformación a riego por aspersión de una superficie de 600 ha.

### 3.5 Conclusiones

La presencia predominante de suelos de plataformas, así como la situación actual de las infraestructuras y el manejo del riego, son los factores que determinan que la eficiencia de aplicación de agua en parcela sea baja en la CRV, situándose de media en el 49 %. El uso de caudales de riego en torno a los

152 L s<sup>-1</sup>, debido al sistema rotacional de distribución de agua, permite que los tiempos de riego sean comparativamente moderados (alrededor de tres horas por hectárea).

Los trasvases de agua entre la red de desagües y la de acequias permiten reutilizar parte del agua perdida por escorrentía y percolación durante el riego. Sin embargo, la eficiencia global de la comunidad sólo se acerca a su potencialidad cuando el sistema opera bajo una cierta escasez del agua, la cual provoca un control más riguroso del riego en parcela y un aprovechamiento más exhaustivo del agua trasvasada. En estas situaciones el índice de aprovechamiento es superior a la eficiencia media de aplicación en parcela, alcanzando valores del 66 %. Estos datos ponen de manifiesto que el sistema tiene la capacidad de alcanzar eficiencias de riego razonables, y que la necesidad de racionalizar el uso del agua no es percibida claramente por los agricultores. La introducción de la tarifa binómica tendrá sin duda un efecto sobre las pautas de riego de los agricultores.

La simulación de los riegos por superficie de la CRV ha permitido determinar el tiempo óptimo de riego en la actual situación de caudales y diseño de tablares, el cual se sitúa en un valor inferior a dos horas por hectárea. De este modo se conseguirían eficiencias de aplicación de agua en parcela del 76 %. Mejoras que supongan un incremento de caudales de riego no incrementarían de forma sensible esta eficiencia, aunque supondrían una reducción adicional del tiempo de riego actual.

Por todas estas razones se concluye que actualmente los agricultores prolongan el riego de cada parcela más allá de lo necesario. Al hacer esto, persiguen aumentar el volumen de agua almacenada en el suelo. De esta manera, esperan minimizar los problemas de estrés hídrico derivados de un intervalo entre riegos excesivamente largo. Sin embargo, los resultados de este trabajo indican que en las plataformas, incluso el menor tiempo de riego que consigue que se cubra totalmente el tablar, aplica más agua de la que el suelo puede retener. Por ello el principal efecto de aumentar el tiempo de riego en parcela es aumentar la duración del intervalo entre riegos. Este efecto es claramente contrario a los intereses de todos los agricultores de la comunidad, ya que produce estrés hídrico en los cultivos, obliga a introducir en la alternativa cultivos que no presentan demanda de agua en verano, y precisa que la jornada de riego sea de 24 horas al día.

A pesar de la expectativa de mejoras en la eficiencia, la escasa y heterogénea *CRAD* de los suelos de plataformas hace recomendable la transformación a riego a presión de la zona. De esta forma, además de reducir la necesidad de mano de obra, se obtendría un mejor abastecimiento hídrico de los cultivos, redundando en una mejores producciones que beneficiarían por igual a todos los agricultores.

Mediante este trabajo se han obtenido una serie de resultados que servirán de apoyo a la toma de decisiones sobre la modernización del regadío de la CRV. El uso de modelos de simulación del riego por superficie ha permitido determinar la situación actual de la comunidad en cuanto al uso del agua, así como analizar diversas alternativas de mejora. Sin embargo, el uso de modelos de simulación dinámicos que reproduzcan la relación del agua de riego con las infraestructuras, la producción agraria y el medio ambiente, permitiría obtener estimaciones más precisas sobre el funcionamiento de una comunidad de regantes. Así, se podrían analizar de forma conjunta las repercusiones económicas, medioambientales y sociales de diferentes escenarios de modernización, de diferentes estrategias de gestión, incluso de diferentes planificaciones agronómicas.

### 3.6 Referencias

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper nº 56. FAO. Roma (Italia). 300 pp.

Bandara, K.M.P.S. 2003. Monitoring irrigation performance in Sri Lanka with high-frequency satellite measurements during the dry season. *Agric. Wat. Manage.*, 58, 159-170.

Basso, L. 1994. Los retornos salinos del polígono de riego de Bardenas I y su contribución a la salinización de los ríos Arba y Riguel. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza. Zaragoza (España). 224 pp.

Bolea, J.A. 1986. Los riegos de Aragón. Grupo Parlamentario Aragonés Regionalista de las Cortes de Aragón. Huesca (España). 579 pp.

Bos, M.G., Replogle, J.A., Clemmens, A.J. 1984. Flow measuring flumes for open channel systems. John Wiley & sons, Inc. Nueva York (EE.UU.). 321 pp.

Burt, C.M., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., Solomon, K.H., Bliesner, R.D., Hardy, L.A., Howell, T.A., Eisenhauer, D.E. 1997. Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. *J. Irrig. Drain. Engrg.*, ASCE, 123(6),423-442.

Cabelguenne, M., Debaeke, P. 1998. Experimental determination and modelling of the soil water extraction capacities of crops of maize, sunflower, soya bean, sorghum and wheat. *Plant and Soil*, 202, 175-192.

Clemmens, A.J. 1987. Delivery system schedules and required capacities. En: *Planning, operation, rehabilitation and automation of irrigation water delivery systems*. Portland (EE.UU.). pp. 18-34.

Cuenca, R. H. 1989. *Irrigation system design: an engineering approach*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs. New Jersey (EE.UU.). 552 pp.

Dechmi, F., Playán, E., Faci, J.M., Tejero, M. 2003a. Analysis of an irrigation district in northeastern Spain: I: Characterisation and water use assessment. *Agric. Wat. Manage.*, 61, 75-92.

Dechmi, F., Playán, E., Faci, J.M., Tejero, M., Bercero, A. 2003b. Analysis of an irrigation district in northeastern Spain: II: Irrigation evaluation, simulation and scheduling. *Agric. Wat. Manage.*, 61, 93-109.

Dedrick, A.R., Clyma, W., Palmer, J.D. 1989. A management improvement process to effectively change irrigated agriculture. En: *Planning for water shortages. Water reallocations and transfers. Drought management*, J. Schaack, Wilson, D.S., Anderson, S.S., (Eds.). Boise (EE.UU.) pp 45-58.

De los Ríos, F. 1966. *Colonización de las Bardenas, Cinco Villas, Somontano y Monegros*. Institución "Fernando el Católico". Zaragoza (España). 56 pp.

De los Ríos, F. 1984. *El agua en la cuenca del Ebro*. Institución "Fernando el Católico". Zaragoza (España). 141 pp.

Faci, J.M., Bensaci, A., Slatni, A., Playán, E. 2000. A case study for irrigation modernisation: I. Characterisation of the district and analysis of water delivery records. *Agric. Wat. Manage.*, 42, 313-334.

Gijnsman, A.J., Jagtap, S.S., Jones, J.W. 2002. Wading through a swamp of complete confusion: how to choose a method for estimating soil water retention parameters for crop models. *Europ. J. Agronomy*, 18, 75-105.

Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario. 1974. *Estudio semi-detallado de los suelos afectados por salinidad de la zona regable de las Bardenas (Zaragoza)*. IRYDA. Madrid (España). 254 pp. + anejos.

Jensen, M.E., Burman, R.D., Allen, R.G. 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 70. American Society of Civil Engineers. Nueva York (EE.UU). 332 pp.

Kostiakov, A.N. 1932. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. En: Trans. Sixth Int. Congr. Soil Sci., (Eds.). Paris (Francia). pp. 17-21.

Lecina, S., Playán, E., Cervero, J., 2001. Ador: un programa para la simulación de los flujos de agua en comunidades de regantes. En: XIX Congreso Nacional de Riegos, Confederación Hidrográfica del Ebro (Eds.), 12-14 Junio 2001, en Zaragoza (España). pp. 167-168.

Losada, A., 1994. Eficiencia técnica en la utilización del agua de riego. Revista de Estudios Agrosociales, 167, 131-154.

Martínez Beltrán J. 1978. Drainage and reclamation of salt-affectation soils. Bardenas Area, Spain. Institut for Land Reclamation and Improvement. Wageningen (Holanda). 321 pp

Martínez-Cob, A., Faci, J.M., Bercero, A. 1998. Evapotranspiración y necesidades de riego de los principales cultivos en las comarcas de Aragón. Institución "Fernando el Católico". Zaragoza (España). 223 pp.

Merriam, J.L., Keller, J. 1978. Farm irrigation system evaluation: A guide for management. Utah State University. Logan (EE.UU.). 271 pp.

Playán, E., Faci, J.M., Serreta, A. 1996. Characterizing microtopographical effects on level-basin irrigation performance. Agric. Wat. Manage., 29, 129-145.

Playán, E., Slatni, A., Castillo, R., Faci, J.M. 2000. A case study for irrigation modernisation: II. Scenario Analysis. Agric. Wat. Manage., 42, 335-354.

Porta, J., López-Acevedo, M., Roquero de Laburu, C. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid (España). 849 pp.

Ray, S.S., Dadhwal, V.K., Navalgund, R.R. 2002. Performance evaluation of an irrigation command area using remote sensing: a case study of Mahi Command, Gujarat, India. Agric. Wat. Manage., 56, 81-91.

Soil Survey Division Staff. 1993. Soil survey manual. United States Department of Agriculture. Handbook No. 18. Washington, D.C. (EE.UU.).

Soil Survey Laboratoy. 1996. Methods Manual. The Soil Survey Analytical Continumm. Soil Survey Investigations Report N° 42 Version 3.0. USDA, NRCS, NSSC. Washington, D.C. (EE.UU.). 693 pp.

Soil Survey Staff. 1992. Keys to soil taxonomy. Pocahontas Press, Inc. Balcksbourg (EE.UU.). 541 pp.

Walker, W.R. 1993. SIRMOD, Surface irrigation simulation software. Utah State University. Logan (EE.UU.). 27 pp.

Walker, W.R.; Skogerboe, G.V. 1987. Surface irrigation. Theory and practice. Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs. New Jersey (EE.UU.). 386 pp.

Zapata, N., Playán, E., Faci, J. M. 2000. Water reuse in sequential basin irrigation. J. Irrig. Drain. Engrg., ASCE, 126(6), 362-370.



**ADOR-simulación, UN MODELO PARA LA  
SIMULACIÓN DE LOS FLUJOS DE AGUA EN  
COMUNIDADES DE REGANTES:  
DESCRIPCIÓN DEL MODELO**

**4**



## 4.1 Introducción

La aplicación de las últimas tecnologías de riego, principalmente en lo que se refiere al control del agua y a las prácticas de gestión, es un aspecto fundamental para conseguir incrementar la productividad del regadío de forma sostenible (Burt y Styles, 1999, Vidal et al., 2001). Los modelos de simulación incorporados a sistemas de apoyo a la toma de decisiones en la planificación y gestión de zonas regables constituyen unas potentes herramientas en este sentido (Hall, 1999; Walker, 1999; Playán et al., 2000). Durante las últimas décadas el desarrollo de dichos modelos ha experimentado un notable crecimiento gracias al avance de la tecnología informática.

Los enfoques utilizados en la simulación del funcionamiento de una zona regable han sido muy diversos. Chávez-Morales et al. (1987, 1992) y Hazrat et al. (2003) desarrollaron modelos que, teniendo en cuenta las infraestructuras de distribución y de regulación de una zona regable, optimizaban la planificación de la misma mediante programación lineal para obtener el mayor rendimiento económico, en un caso, y el mayor aprovechamiento del agua en otro. Kuo et al., (2000) también desarrollaron un modelo para el apoyo a la planificación de una zona regable. Mediante el mismo determinaban a través de algoritmos genéticos la alternativa de cultivos y la distribución de agua que optimizaban el rendimiento económico de la zona en función de sus características y la capacidad de sus infraestructuras. Otros autores han desarrollado modelos orientados exclusivamente a la optimización de la gestión del reparto del agua en redes con distribución rotacional, de forma que se consiga un reparto más eficaz y equitativo (Suryavanshi y Reddy, 1986; Khepar et al., 2000).

En otros casos se han estudiado los aspectos organizativos y sociales de una zona regable, así como las técnicas de producción, para modelizar el uso del agua por parte de los agricultores. Ferguson (1989) estableció para ello relaciones empíricas entre variables de gestión y de calidad de suministro de agua. Lamacq (1997) utilizó, junto con modelos hidráulicos de redes de distribución de agua, modelos de acción que consideran el proceso de toma de decisiones de los agricultores bajo diferentes situaciones, reproduciendo así el efecto de las variables de manejo. Mateos et al. (2000) analizaron las relaciones topológicas entre las unidades de riego de una zona regable mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG). De esta forma simularon el efecto que sobre el comportamiento del sistema y la calidad del agua tiene la organización de dichas unidades.

Un último grupo de trabajos trata de reproducir el funcionamiento de zonas regables mediante la aplicación conjunta de diversos modelos de simulación que permitan analizar en detalle distintos escenarios de planificación y manejo. Merkle (1994), Yamashita y Walker (1994), y Prajamwong et al. (1997) desarrollaron sistemas en los que, a partir de balances diarios de agua (y sales según los casos) a nivel de parcela, estimaban la demanda potencial de agua de una zona regable y la respuesta productiva de los cultivos. Para ello utilizaban funciones de producción, modelos de balance hidrosalino y modelos de agregación de caudales en redes ramificadas. Una extensión de este tipo de sistemas a las formas de funcionamiento más comunes en el mundo es el sistema denominado *Scheme Irrigation Management Information System* (SIMIS), el cual incorpora, además de los modelos de simulación, utilidades SIG y de gestión administrativa de las áreas regables (Mateos et al., 2002; Lozano y Mateos, 2003).

En este trabajo se presenta un modelo de apoyo a la toma de decisiones en la planificación y gestión de regadíos denominado ADOR-simulación. Esta aplicación informática combina una serie de módulos cuyo funcionamiento integrado permite simular los flujos de agua que se dan en una comunidad de regantes. ADOR-simulación reproduce así la interacción del agua de riego con las infraestructuras, la producción agraria y el medio natural dentro de un sistema agrícola de regadío. De esta forma se pueden conseguir estimas más ajustadas a la realidad sobre el funcionamiento de una comunidad de regantes que las obtenidas exclusivamente a partir de evaluaciones de riego (Lecina et al., 2001).

El objetivo del desarrollo de ADOR-simulación ha sido proporcionar una herramienta analítica capaz de evaluar diferentes escenarios de planificación o

gestión en comunidades de regantes. La estructura del modelo se ha realizado de tal forma que permita conocer el impacto que puede provocar la modificación de las infraestructuras, los sistemas de riego, la gestión del agua, las prácticas culturales, o la alternativa de cultivos sobre la eficiencia en el uso del agua, la producción agraria y los retornos de riego. De esta manera, el modelo puede aplicarse en casos como el análisis de estrategias de gestión del agua ante un cambio en la alternativa de cultivos, o en situaciones de escasez de agua, al anticipar la respuesta productiva de los cultivos y la demanda de agua de riego. Los procesos de modernización de regadíos también pueden apoyarse en la capacidad del sistema de evaluar en términos de producción y de conservación de agua actuaciones sobre las infraestructuras y sistemas de riego.

El sistema ADOR-simulación se ha desarrollado dentro de un proyecto denominado *Apoyo a las Decisiones en la Organización de Regadíos (ADOR)*. Este proyecto ha tenido por objetivo contribuir a la mejora del uso del agua de riego mediante el desarrollo de aplicaciones informáticas que faciliten la gestión del agua en las comunidades de regantes, aumenten su capacidad técnica, y permitan estimar las repercusiones económicas, medioambientales y sociales de la modernización de los regadíos.

Además de ADOR-simulación se ha desarrollado un programa informático para la gestión diaria de las comunidades de regantes llamado ADOR-gestión. Este programa, mediante una base de datos relacional donde se almacenan todos los datos referentes a la propia comunidad, como usuarios, parcelas o infraestructuras de riego, permite organizar la distribución de agua, proceder a su facturación y a la de otros conceptos relativos al riego, o conocer las necesidades hídricas de los cultivos, entre otras utilidades. Todos los datos procedentes de la gestión también se almacenan, lo que permite su visualización gráfica mediante un SIG.

El uso conjunto de estas dos aplicaciones posibilitará aprovechar la sinergia que supone contar en un mismo paquete informático con el inventario de datos de infraestructura y gestión de una comunidad, junto con un sistema de apoyo a la toma de decisiones a la planificación y a la gestión que opera sobre dichos datos.

El desarrollo del proyecto se realizó sobre el caso práctico de la Comunidad de Regantes V de Bardenas. Esta comunidad de riego por superficie es representativa de los regadíos tradicionales del valle del Ebro (nordeste de

España). Estos regadíos, creados a mediados del siglo XX, se caracterizan por su insuficiente capacidad de regulación y transporte de agua para el riego por superficie, su gestión escasamente tecnificada y, en determinadas zonas o épocas, por la escasez de agua de riego.

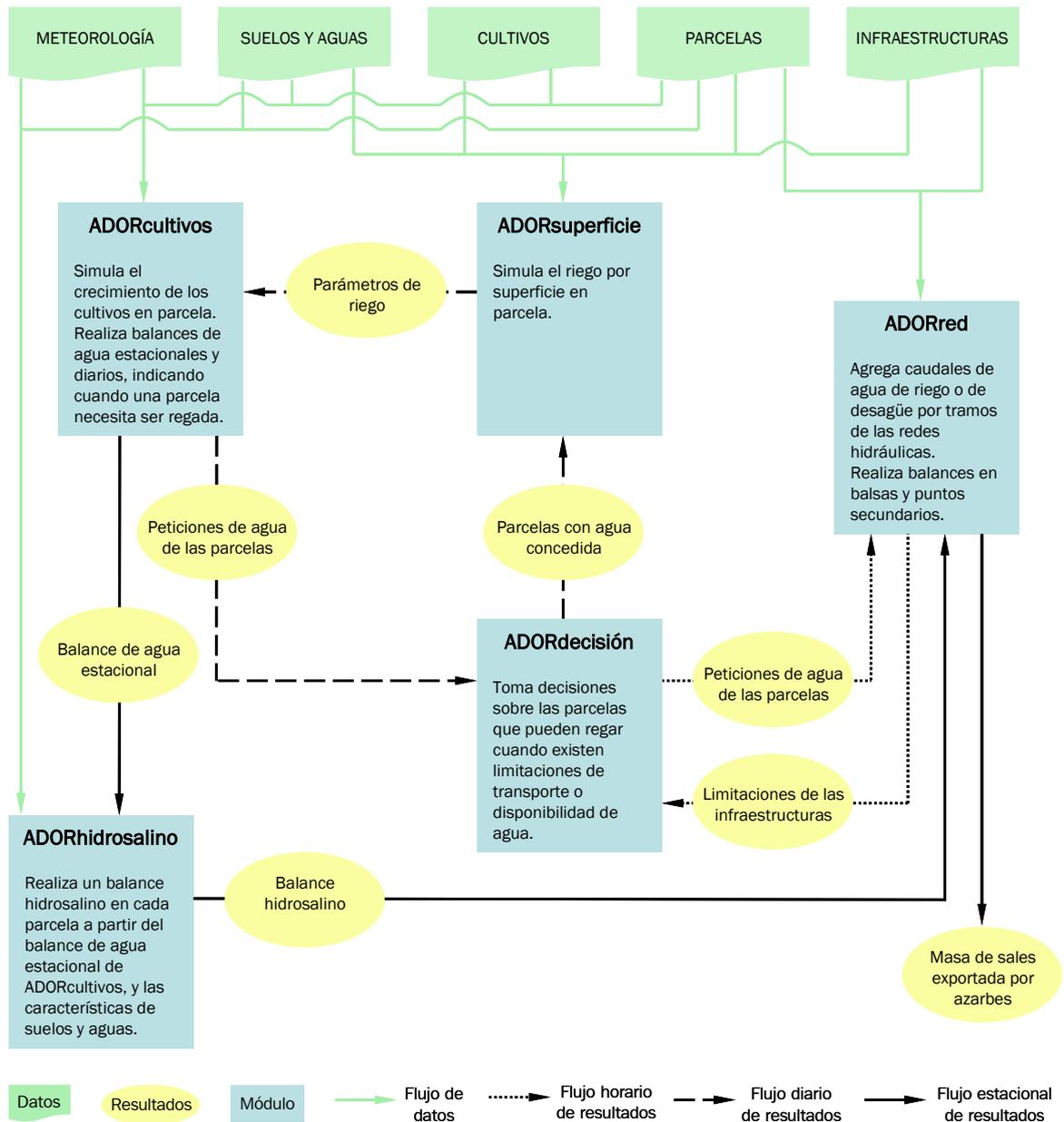
En el presente trabajo se describe el sistema ADOR-simulación en su orientación para riego por superficie. Actualmente se sigue trabajando en este proyecto de investigación de cara a integrar en el funcionamiento del sistema el modelo combinado de riego por aspersión y crecimiento de cultivos desarrollado y validado por Dechmi et al. (2004).

## 4.2 Descripción del modelo

El modelo está compuesto por cinco módulos de simulación orientados a la distribución de agua en lámina libre y al riego por superficie. Estos módulos reproducen el riego propiamente dicho, el crecimiento de los cultivos, el balance hidrosalino, el funcionamiento de las infraestructuras de riego y la toma de decisiones en el reparto del agua entre los agricultores. El funcionamiento conjunto de estos módulos en ADOR-simulación se muestra de forma esquemática en la Figura 4.1.

La parcela es la unidad espacial sobre la que se simula el riego, el crecimiento de los cultivos y el balance hidrosalino. La escala temporal de simulación varía según los módulos, siendo puntual para reproducir el riego, diaria en el caso de los cultivos, y de la totalidad del periodo de estudio para el balance hidrosalino.

La simulación del funcionamiento de las infraestructuras de riego comprende tanto las redes de distribución y de desagüe de agua, como las balsas de regulación, además de posibles puntos secundarios de suministro de agua, como pueden ser pozos, ríos, e incluso transferencias de agua entre la red de desagüe y la de distribución. En este caso la simulación se puede realizar a escala horaria, salvo en el submódulo de red de desagües, cuyos volúmenes de agua se agregan al finalizar el periodo de estudio.



**Figura 4.1** Descripción esquemática del modelo ADOR-simulación

A partir de los balances de agua diarios simulados por el módulo de cultivos en cada parcela, y de las propias restricciones de capacidad de las infraestructuras de distribución y de regulación, el módulo de toma de decisiones organiza el reparto de agua entre las diferentes parcelas que necesitan regar. Para ello analiza la situación de las infraestructuras y las peticiones de agua en el mismo intervalo de tiempo de simulación que el módulo de infraestructuras.

De esta forma el modelo ADOR-simulación es capaz de reproducir el funcionamiento de una comunidad de regantes durante un determinado periodo de tiempo, considerándose generalmente un año. Los resultados de la ejecución del modelo están constituidos por una serie de contadores y de índices, los cuales permiten seguir la evolución del funcionamiento de la comunidad durante el periodo de simulación (caudales horarios por red de distribución, evolución del contenido del agua del suelo de cada parcela, etc), así como comparar diferentes alternativas de gestión o planificación (eficiencias de riego, demandas unitarias de agua, salinidad de las aguas de retorno, etc).

Para poder realizar esta simulación es necesario proporcionar al modelo una serie de datos sobre las características del medio natural de la zona, así como de sus infraestructuras de riego y sus sistemas de gestión. Estos datos se agrupan de la siguiente manera (Figura 4.1):

1. **Datos meteorológicos:** se deben proporcionar datos diarios sobre temperaturas, precipitación y evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ).
2. **Datos de suelos y aguas:** para poder realizar balances de agua en el suelo, así como balances hidrosalinos, y simular riegos por superficie, se requieren una serie de datos sobre propiedades físicas y químicas de los suelos. Estas propiedades se deben definir para cada uno de los tipos de suelo que se distinguen en la zona de estudio. Asimismo, se debe especificar la salinidad del agua de riego.
3. **Datos de cultivos:** para cada uno de los cultivos que se consideren en el modelo se deben indicar su ciclo fenológico, sus coeficientes de cultivo y sus coeficientes de sensibilidad al estrés hídrico para la zona de estudio, así como su altura y profundidad de raíces máximas.
4. **Datos de parcelas:** al definir las parcelas catastrales, además de especificar su superficie y las dimensiones tipo de sus unidades de riego por superficie (tablares), se les debe asignar un tipo de suelo con su contenido de agua inicial, un cultivo con su fecha de siembra, y el tiempo de corte de la unidad de riego tipo (esta última variable también puede obtenerse por optimización).

También se debe indicar el tramo de las redes hidráulicas de las que se sirve cada parcela para tomar agua o para desaguar.

5. **Datos de infraestructuras de riego:** en el caso de las redes hidráulicas, además de definir para cada tramo de las mismas su capacidad de transporte, y en el caso de la red de distribución su caudal de servicio, se debe especificar la jerarquía de las propias redes, las cuáles deben ser estrictamente ramificadas. En el caso de las infraestructuras de regulación se deben indicar su capacidad y el dominio de la red a la que abastecen. Este dominio también se debe especificar en el caso de los puntos de suministro secundarios, al igual que los caudales máximos que pueden proporcionar y, en el caso de transferencias de agua, el punto de detracción en la red de desagüe. El tiempo diario de operación de la red de distribución, junto con su horario, también deben ser especificados por el usuario.

#### 4.2.1 ADORsuperficie: módulo de simulación de riego por superficie

La simulación del riego por superficie se realiza mediante el módulo ADORsuperficie. Este módulo está compuesto por un modelo hidrodinámico unidimensional para resolver de forma explícita las ecuaciones de Saint Venant que rigen el flujo de agua en el riego por superficie (Playán et al, 1994):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + I = 0 \quad [4.1]$$

$$\frac{1}{A g} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2 Q}{A^2 g} \frac{\partial Q}{\partial x} + (1 - F^2) \frac{\partial h}{\partial x} = S_0 - S_f \quad [4.2]$$

donde  $A$  es el área de una sección del fluido,  $Q$  es el caudal unitario,  $I$  es la tasa de infiltración,  $t$  es la variable independiente tiempo,  $x$  es la variable independiente espacio,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $F$  es el número de Froude,  $h$  es el calado del fluido,  $S_0$  es la pendiente del campo, y  $S_f$  es la pendiente de fricción.

Este tipo de modelo simula la distribución espacial de la infiltración del agua de riego en el suelo y permite estimar los índices de calidad del riego (Walker

y Skogerboe, 1987). Para ello el usuario debe definir el número de puntos de cálculo a lo largo de la unidad de riego sobre los que desea realizar la simulación (un valor típico en el módulo es 50). Sobre una parte de estos mismos puntos, escogidos a lo largo de la unidad de riego, también se simulará el desarrollo y el rendimiento del cultivo mediante el módulo de cultivos (un valor típico del número de este tipo de puntos es 12). Actualmente el modelo está capacitado para simular el riego en tablares, no existiendo de momento la posibilidad de simular el riego por surcos.

Con el fin de mejorar los resultados de la simulación, se ha incorporado al modelo la capacidad de reproducir el efecto que sobre la distribución del agua en el suelo tiene la variabilidad espacial de la elevación del terreno. Para ello se ha utilizado la desviación estándar de la elevación como variable de control. Este factor es de gran importancia en la simulación del riego por superficie, dada su influencia sobre el tiempo de riego y la calidad del mismo (Playán et al., 1996).

La dosis requerida es la que se desea añadir al suelo con el riego (Cuenca, 1989). En el riego por superficie, al aplicarse dosis elevadas, se toma como dosis objetivo de riego una parte importante de la capacidad de retención del agua disponible del suelo (*CRAD*) (Porta et al., 1999). *ADORSuperficie* tiene la posibilidad de asumir una dosis objetivo diferente en cada uno de los puntos de simulación. Esta capacidad permite implementar el efecto que sobre la calidad del riego tiene la variabilidad espacial de la *CRAD*.

Otra capacidad del modelo es la de incluir la existencia de una constricción al flujo de agua de escorrentía al final de la unidad de riego. Esta constricción es frecuente en condiciones reales dado que no se suele permitir la escorrentía libre a lo largo de toda la anchura del tablar, sino que se realiza a través de una o varias aberturas practicadas en el caballón que lo delimita. Dada la dificultad de modelizar matemáticamente esta constricción, el modelo proporciona la posibilidad al usuario de introducir un factor de corrección que ajuste el caudal de escorrentía libre simulado por el modelo al medido en condiciones reales.

Para simular el riego en cada una de las parcelas de la zona de estudio, *ADORSuperficie* toma las propiedades físicas del suelo correspondientes al tipo de suelo asignado a la parcela. Asimismo, el tiempo de riego y las características del tablar tipo son las especificadas para cada parcela según los datos de entrada

introducidos por el usuario. El caudal de riego se toma del caudal de servicio del tramo de la red de distribución del cual se abastece la parcela.

Además de simular el riego por superficie con un tiempo de corte definido por el usuario, el modelo permite optimizar el riego determinando el tiempo de corte que proporciona la mejor eficiencia de aplicación. Para ello se utiliza una rutina de cálculo en la que se realizan simulaciones iterativas reduciendo el tiempo de corte de forma proporcional según un coeficiente definido por el usuario (generalmente entre 0,95 y 0,99). En la simulación que inicia este proceso el riego se detiene en el momento en el que el frente de avance alcanza el final de la unidad de riego. El proceso finaliza cuando la dosis de agua aplicada en un porcentaje de puntos de simulación definido por el usuario es inferior a la dosis requerida media, tomándose los resultados de la simulación anterior.

La salida del modelo, además de suministrar el reparto del volumen de agua aplicada según su destino y los índices de calidad del riego (Burt et al., 1997), proporciona la dosis infiltrada en cada punto de cálculo. Asimismo, también se determina el tiempo necesario para regar la totalidad de la superficie de la parcela en función del tiempo de corte utilizado en la simulación del riego en el tablar tipo.

#### **4.2.2 ADORcultivos: módulo de simulación de cultivos**

ADORcultivos es un módulo que permite simular el crecimiento y las necesidades hídricas de los cultivos. La simulación se lleva a cabo para cada parcela en una parte de los puntos de cálculo a lo largo de la unidad de riego considerados en ADORsuperficie.

Los datos necesarios para el funcionamiento del modelo son, además de los referentes al cultivo, los característicos del tipo de suelo de cada parcela, así como los datos meteorológicos diarios, incluida la evapotranspiración de referencia, como se ha indicado anteriormente. En el momento en el que se aplica un riego, los resultados del mismo se transfieren de ADORsuperficie a ADORcultivos, con el fin de incluir las dosis de riego de cada punto en el correspondiente balance de volumen.

Al igual que en el modelo de simulación de riego, la capacidad de retención de agua disponible del suelo, así como su profundidad efectiva, pueden tomar valores diferentes en cada uno de los puntos de simulación. De esta manera se pretende reproducir el efecto de la variabilidad espacial de estos parámetros físicos de los suelos. La introducción de dicha variabilidad, unida a la procedente de las dosis de agua aplicadas en cada punto durante el riego, permite realizar una simulación más ajustada a la realidad (Zapata et al. 2000).

Los principios seguidos para la simulación del desarrollo de los cultivos y de sus necesidades hídricas se han basado en los propuestos en el modelo CROPWAT (Smith, 1992). Esta decisión se ha tomado considerando la adecuada respuesta al estrés hídrico mostrada por CROPWAT, contrastada localmente para el cultivo de maíz por Cavero et al. (2000) y Dechmi et al. (2004), así como su simplicidad.

La principal mejora de ADORcultivos sobre CROPWAT se encuentra en la definición de la duración de las fases de crecimiento en forma de porcentaje sobre la integral térmica del cultivo (Gallagher, 1979) en lugar de utilizar una escala de tiempo. Nielsen y Hinkle (1996) observaron que la estimación de la evapotranspiración del cultivo es más precisa utilizando coeficientes de cultivo basados en esta unidad térmica, ya que de esta manera la estima se ajusta en función de las condiciones meteorológicas particulares de cada año.

La estimación de las necesidades hídricas de los cultivos utilizada para llevar a cabo el balance de volumen se ha realizado siguiendo la metodología propuesta por Allen et al. (1998). Dicho balance de volumen se realiza para cada uno de los puntos de simulación, ya que, como se ha indicado anteriormente, los valores de CRAD, profundidad efectiva y dosis de agua aplicada durante el riego pueden diferir de un punto a otro.

El balance de agua se realiza diariamente en una única célula para todo el perfil efectivo del suelo. El contenido de agua en el suelo para cada punto de referencia varía en función del contenido de agua en el día anterior, la aportación de la precipitación, la evapotranspiración real del cultivo, la dosis de agua aplicada con el riego, la percolación profunda (en el caso de superarse la CRAD) y la humedad de los nuevos horizontes de suelo explorados por las raíces del cultivo durante su crecimiento (esta humedad se considera igual a la del inicio del periodo de simulación definida por el usuario). La formulación matemática del

balance de agua que se realiza cada día  $j$  en cada punto de cálculo  $i$  donde se simula el cultivo es la siguiente:

$$\theta_{ij} = \theta_{i(j-1)} - ETcr_{ij} + P_j + DR_{ij} - PP_{ij} + \theta_{Rij} \quad [4.3]$$

donde  $\theta$  es el contenido de agua del suelo,  $ETcr$  es la evapotranspiración real del cultivo,  $P$  es la precipitación,  $DR$  es la dosis riego,  $PP$  es la percolación profunda, y  $\theta_r$  es el contenido de agua en el nuevo horizonte de suelo explorado por las raíces en su crecimiento diario.

Paralelamente a la realización de los balances se calcula el agotamiento de agua permisible en el suelo en función del tipo de cultivo y de su evapotranspiración. De esta manera se estima el nivel de agua en el suelo por debajo del cual el cultivo comienza a sufrir estrés hídrico. La ecuación utilizada para dicho cálculo es la propuesta por Allen et al. (1998):

$$NAP_{ij} = p_{ij} CRAD_{ij} \quad [4.4]$$

donde  $NAP_{ij}$  es el nivel de agotamiento permisible en el punto de cálculo  $i$  para el día  $j$ ,  $p$  es la fracción de agotamiento permisible según el cultivo y su evapotranspiración, y  $CRAD$  es la capacidad de retención de agua disponible del suelo.

A partir de la comparación de los valores de contenido de agua en el suelo y el déficit de agua permisible se determina en qué puntos de cálculo se está produciendo estrés hídrico. El usuario tiene la posibilidad de definir el umbral de puntos con un contenido de humedad inferior al mínimo permisible a partir del cual la parcela solicitará agua para riego. El caudal de la petición será igual al de servicio del tramo de la red de distribución por el que riega la parcela. El modelo incorpora la capacidad de realizar dicha solicitud no sólo en función del contenido de agua en el suelo, sino también en función de las prácticas culturales propias de cada cultivo. De esta forma se han pretendido reproducir parcialmente las pautas de comportamiento frente al riego que con frecuencia adoptan los agricultores. En este comportamiento pueden existir componentes no ligadas al balance hídrico (Lamacq, 1997; Labbé et al., 2000), cuya modelización se escapa a los objetivos de este trabajo.

Como consecuencia de esta gestión del riego en las parcelas, así como de la propia capacidad de la red de distribución de agua para proporcionar servicio a las parcelas en el momento en que se solicita, el cultivo puede verse sometido a un cierto nivel de estrés hídrico (localizado en partes del tablar o en su totalidad). Este estrés hídrico puede provocar una disminución sensible de su tasa de evapotranspiración y, por tanto, de su rendimiento.

La evapotranspiración real del cultivo, que considera el efecto del estrés hídrico, se estima a partir del contenido de agua en el suelo y de su nivel mínimo permisible, según la ecuación propuesta por Allen et al. (1998):

$$ETcr_{ij} = ETC_j \quad \text{si} \quad CRAD_{i(j-1)} - \theta_{i(j-1)} < NAP_{ij} \quad [4.5]$$

$$ETcr_{ij} = ETC_j \frac{\theta_{i(j-1)}}{(CRAD_{ij} - NAP_{ij})} \quad \text{si} \quad CRAD_{i(j-1)} - \theta_{i(j-1)} > NAP_{ij} \quad [4.6]$$

donde  $ETcr_{ij}$  es la evapotranspiración real del cultivo en el punto de cálculo  $i$  en el día  $j$ ,  $ETc$  es la evapotranspiración del cultivo,  $\theta$  es el contenido de agua del suelo,  $CRAD$  es la capacidad de retención de agua disponible del suelo, y  $NAP$  es el nivel de agotamiento permisible de agua en el suelo.

El efecto del estrés hídrico sobre el rendimiento se ha modelizado usando los factores de respuesta de cada fase de desarrollo del cultivo propuestos por Stewart et al. (1975) y desarrollados por Doorenbos y Kassam (1979). La reducción acumulada de rendimiento a lo largo de todo el ciclo fenológico del cultivo se determina a partir de la siguiente ecuación (Doorenbos y Kassam, 1979):

$$\frac{y_i}{y_{max}} = \prod_{f=1}^4 \left[ 1 - ky_f \left( 1 - \frac{ETcr_{if}}{ETC_f} \right) \right] \quad [4.7]$$

donde  $y_i$  es el rendimiento real cosechado en el punto de cálculo  $i$ ,  $y_{max}$  es el rendimiento máximo que puede obtenerse con un suministro hídrico óptimo,  $ky_f$  es el factor de respuesta para la fase de crecimiento  $f$ ,  $ETcr$  es la evapotranspiración real del cultivo, y  $ETc$  es la evapotranspiración del cultivo.

Además de simular el desarrollo del cultivo durante todo su ciclo fenológico, el modelo también realiza un balance hídrico durante la época de no cultivo. El balance se lleva a cabo en un paso para la totalidad de dicho periodo, habiendo determinado previamente la evapotranspiración diaria mediante la utilización de un coeficiente de evaporación para suelo desnudo asignado por el usuario. De esta forma se puede extender la aplicación del módulo de balance hidrosalino más allá de la época de cultivo.

### 4.2.3 ADORhidrosalino: módulo de simulación hidrosalino

ADORhidrosalino es una adaptación del modelo conceptual hidrosalino denominado CIRFLE para la simulación de los flujos de sales de los retornos del riego. Este modelo, desarrollado por Quílez (1999) a partir del originalmente propuesto por Tanji (1977), se compone de un submodelo hidrológico y de un submodelo salino. Está basado en el principio de conservación de masas, incorpora la eficiencia en el lavado de las sales solubles del suelo, y está enfocado a la zona de raíces de los cultivos. El modelo predice la concentración y masa de sales de las aguas que percolan por debajo de la zona de raíces.

En su aplicación en la zona regable de Bardenas I (Zaragoza, España), CIRFLE estimó satisfactoriamente la concentración salina de los flujos de retorno para zonas con distintos niveles de salinidad, y la concentración y masa de sales de los retornos de riego de todo el polígono (Quílez, 1999). Su aplicación a otras zonas debe ser previamente contrastada.

La adaptación de CIRFLE realizada en ADORhidrosalino se aplica a cada una de las parcelas de simulación, considerando para ello los resultados del balance de agua realizado para el conjunto del periodo de simulación por ADORcultivos, así como las propiedades físico-químicas del tipo de suelo asignado a cada parcela. Dado que los parámetros hidrológicos son tomados del modelo de cultivos, en ADORhidrosalino únicamente se ha incorporado el submodelo salino de CIRFLE.

Este submodelo considera en el balance salino la posibilidad de que el agua de riego pueda precipitar o disolver carbonato cálcico, y/o pueda disolver yeso si se encuentra presente en el suelo. Para el caso del carbonato cálcico, el modelo incorpora una ecuación de regresión obtenida localmente entre la fracción

de lavado y la diferencia de concentración entre la sal precipitada y la disuelta. En el caso del yeso, su contribución se realiza de forma separada suponiendo la existencia de yeso mineral suficiente como para saturar la solución del suelo. Por estas razones, si la zona donde se aplica el modelo presenta suelos con una cantidad limitada de yeso o abundancia de otras sales solubles, su aplicación puede ser cuestionable, siendo más recomendable en estos casos el uso de modelos de tipo transitorio (Tanji et al., 1972).

Con todo ello, el balance salino aplicado a cada parcela para la totalidad del periodo de simulación se expresa de la siguiente forma (Quílez, 1999):

$$\frac{dM}{dt} = M_{diw} + M_{isw} + M_{sp} + M_{gsp} + M_p - M_{dp} - M_{sd} - M_{fsw} - M_{sirr} = 0 \quad [4.8]$$

donde  $dM/dt$  es la tasa de cambio de la masa de sales almacenada en la zona de raíces,  $M_{diw}$  es la masa de sales en el agua de riego,  $M_{isw}$  es la masa de sales en el agua inicial del suelo,  $M_{sp}$  es la masa de sales precipitada,  $M_{gsp}$  es la masa de yeso disuelta realmente en el agua del suelo,  $M_p$  es la masa de sales en la precipitación,  $M_{dp}$  es la masa de sales en el agua de percolación profunda,  $M_{sd}$  es la masa de sales disuelta,  $M_{fsw}$  es la masa de sales en el agua final que permanece en el suelo, y  $M_{sirr}$  es la masa de sales en las aguas de retorno.

En la aplicación de esta ecuación se ha despreciado la existencia de flujos de agua laterales, y se ha considerado que el agotamiento de agua en el suelo entre el inicio y el final del período de simulación es estacionario.

El uso de ADORhidrosalino permite por tanto estimar la masa y concentración de sales del agua de percolación de cada parcela y, mediante su agregación, la del agua que discurre por la red de desagüe para el conjunto del periodo de simulación. No obstante, en el caso de que existan puntos de suministro secundario con una calidad de agua diferente a la de la fuente de agua principal, como las transferencias entre la red de desagüe y de distribución, la aplicación del modelo hidrosalino pierde su capacidad predictiva. La razón de este problema estriba en el hecho de no poder determinar *a priori* el destino de las aguas usadas para riego según su origen. Ello hace imposible estimar las pérdidas de sales de cada parcela mediante un modelo que no permita realizar balances hidrosalinos diarios.

#### 4.2.4 ADORred: módulo de simulación de infraestructuras de riego

La simulación del funcionamiento de las infraestructuras de riego se realiza a través del módulo ADORred. Este módulo está compuesto por varios submódulos para reproducir los flujos de agua que se producen en las redes hidráulicas que dan servicio a las parcelas.

El primer submódulo es el correspondiente al de la red de distribución de agua, incluyendo balsas de regulación y puntos secundarios de suministro. Su función es agregar las peticiones de agua que realizan las parcelas y que le transfiere el módulo de toma de decisiones. Así, este submódulo comprueba si la red tiene capacidad suficiente para poder transportarlas. De forma paralela se determina la demanda que es capaz de abastecer el volumen de agua almacenado en cada momento en las balsas y el disponible en los puntos secundarios de suministro.

La rutina de cálculo que incorpora este submódulo para realizar la agregación de las peticiones se basa en una matriz de jerarquía. En esta matriz se indica para cada tramo de la red los tramos a los que proporciona servicio directa o indirectamente. Del mismo modo se tiene en cuenta el dominio regable de las balsas de regulación y de los puntos secundarios. De esta forma se consigue evaluar horariamente la capacidad de transporte de la red de distribución de agua en lámina libre, sin necesidad de recurrir a modelos hidráulicos. Dichos modelos no aportarían una sensible mejora de la estimación para el nivel de detalle al que se trabaja con ADOR-simulación, además de requerir importantes trabajos de toma de datos y de calibración.

La estimación de las pérdidas de agua en la distribución se realiza para cada riego en función del caudal de servicio y del intervalo de tiempo entre el momento en el que concluye el riego de la parcela y el inicio de la siguiente hora. Aunque este cómputo supone una simplificación relevante de la realidad, permite tener una estima aproximada de acuerdo al nivel de detalle del modelo.

El submódulo correspondiente a la red de desagüe utiliza la misma rutina de cálculo que el de la red de distribución por lo que, al igual que en éste, únicamente se puede simular el funcionamiento de una red estrictamente ramificada. El submódulo agrega los volúmenes de pérdidas de agua por escorrentía y percolación, además de los correspondientes a las pérdidas en la red de distribución. Las masas de sales de los retornos de riego determinados para cada parcela por ADORhidrosalino también son agregadas. En este caso, y dado

que el tiempo de respuesta en la red puede prolongarse durante días en el caso de los volúmenes de agua de percolación profunda, la simulación se lleva a cabo al finalizar el periodo de simulación para la totalidad del mismo. La realización de simulaciones diarias necesitaría la aplicación de modelos hidrogeológicos que se escapan a los objetivos de ADOR-simulación.

Igualmente, para evitar el uso de este tipo de modelos hidrogeológicos se deja al criterio del usuario especificar qué proporción de pérdidas por percolación afloran finalmente en la red de desagüe, según su experiencia local o los resultados de estudios previos. ADORred considera que dichas pérdidas para cada parcela aparecen en el mismo tramo de la red de desagüe que le proporciona servicio. Esta simplificación permite tener una estima de los caudales de percolación evacuados por los desagües soslayando el problema de la localización. Por tanto, se pueden obtener estimas aceptables en los desagües principales de la red que conducen las aguas evacuadas fuera de la zona de estudio, siempre que ésta sea lo suficientemente grande.

El módulo permite la existencia de conexiones entre la red de distribución y la de desagüe y que se produzcan transferencias de agua entre ambas. Estas conexiones son consideradas como puntos de suministro secundarios, y el usuario debe definir el caudal máximo de detracción. ADORred contabiliza el volumen de agua transferida en el periodo de simulación, que se descuenta del volumen de agua total que circula por el tramo de la red de desagüe desde el que se produce la transferencia.

#### **4.2.5 ADORdecisión: módulo de simulación de toma de decisiones en la distribución de agua**

El módulo ADORdecisión es el núcleo de ADOR-simulación, al ser el responsable de reproducir la toma de decisiones en la distribución de agua y, por tanto, del funcionamiento de la comunidad de regantes que se esté simulando. El módulo está capacitado para realizar una distribución de agua negociada restringida, con caudal fijo (Clemmens, 1987). Este modo de distribución puede asemejarse al de turnos fijos en el caso de sistemas en los que la capacidad de transporte de la red se encuentre muy limitada con respecto a las necesidades de agua.

El modelo se ejecuta de forma horaria, tomando las peticiones de agua emitidas por las parcelas a través de ADORcultivos, así como las de aquellas parcelas que iniciaron el riego horas atrás y que por tanto también requieren agua. Con dichas peticiones el modelo inicia la simulación asignando las peticiones a las diferentes fuentes de agua. En primer lugar, y en caso de existir puntos secundarios de agua, se comienza por asignar sus caudales a las parcelas que solicitan agua dentro de su dominio regable. La preferencia para su aprovechamiento la tendrán, aparte de las parcelas que ya hayan iniciado el riego con dichos caudales, aquellas que se encuentren más próximas a estos puntos secundarios. Esto es así al considerarse que se trata de pequeñas captaciones que a lo sumo pueden abastecer unas pocas parcelas simultáneamente.

Posteriormente se continúa con las balsas de regulación si las hubiere, determinando aquellas peticiones que se están realizando dentro del dominio regable de cada balsa. Una vez determinadas, se comprueba primeramente a través de ADORred si la red de distribución tiene capacidad suficiente para transportar el volumen solicitado. En caso afirmativo se verifica, también con el módulo de infraestructuras, si el volumen de agua solicitado puede ser abastecido por las balsas en función de su nivel de almacenamiento. La verificación se establece considerando el volumen solicitado diario, no el horario, de forma que se asegure el suministro de agua sin interrupción a las parcelas que se les conceda agua a través de las balsas. En el caso de que no se puedan conceder las peticiones de todas las parcelas por limitaciones en la red de distribución o en el nivel de agua almacenada en balsas, se procede a realizar la concesión de agua a las parcelas según un orden de prelación, hasta que se completa la capacidad de distribución o se agota el agua en las balsas.

La realización de dicha prelación la lleva a cabo ADORdecisión en función de una serie de criterios a elección del usuario. En primer lugar se realiza la concesión de agua a las parcelas que ya habían comenzado a regar horas atrás. Esta concesión se asigna de manera automática, con el objetivo de asegurar que no se interrumpa el riego una vez iniciado. Con el resto de peticiones, se van seleccionando una a una, comprobando en cada caso si pueden ser admitidas por la red de distribución y por las balsas, teniendo en cuenta el agua comprometida para las concesiones ya realizadas a las parcelas que habían iniciado el riego con anterioridad. La ordenación de las peticiones se puede realizar de dos formas. En un caso se atiende únicamente al número de días que de forma consecutiva vienen solicitando agua las parcelas. Alternativamente, se puede realizar la ordenación añadiendo al criterio anterior la sensibilidad del cultivo al estrés

hídrico, en función de su estado fenológico, a través de los factores de respuesta (Stewart et al., 1975). De esta forma se puede distinguir entre dos tipos de gestión en la asignación de concesiones teniendo en cuenta el nivel técnico de la comunidad.

Una vez asignadas las peticiones de agua dentro del dominio regable de las balsas, se pasa a realizar tal asignación con la fuente de suministro principal cuyo dominio regable es la totalidad de la red. El procedimiento que se sigue es esencialmente el mismo que se usaba para las balsas. En este caso las peticiones que se consideran son todas aquellas que no han podido ser satisfechas por las balsas, por encontrarse fuera de su dominio regable, por no tener suficiente capacidad de transporte, o por no existir suficiente agua almacenada.

Realizadas todas las concesiones de agua que las infraestructuras de riego pueden permitir, el modelo evalúa la posibilidad de poder abastecer a las balsas de regulación en el periodo horario que se esté simulando. Para ello determina el caudal mínimo de abastecimiento que se puede conceder a las balsas considerando los caudales ya comprometidos para el riego de las parcelas. Este cálculo es realizado por ADORred dentro de la ruta de suministro entre la fuente principal o secundaria de agua y las balsas. Al igual que en el caso de las peticiones de agua de las parcelas, también se establece un orden de prelación si no pueden ser atendidas todas las balsas, existiendo dos criterios de preferencia. El primero consistente en la comparación del volumen de agua solicitado a cada balsa para el riego en parcela, y el segundo en función de su nivel relativo de almacenamiento de agua en el momento de realizar la ordenación.

De esta forma concluye el proceso de asignación de concesiones de agua para el riego de las parcelas, cuyo resultado es un listado en el que se especifican las parcelas a las que se les ha concedido agua, el caudal y el tramo de red por el que se abastecen. Dicho listado es tomado por ADORsuperficie para proceder a la simulación del riego en aquellas parcelas en las que se inicia el riego. Existe la posibilidad, a fin de acortar el tiempo de ejecución, de realizar una única simulación de riego en cada una de las parcelas. Sus resultados se archivan para aplicarlos cada vez que se realice un riego a lo largo de la campaña.

Al finalizar el tiempo de funcionamiento de la red establecido por el usuario, y en caso de que éste no abarque las 24 h del día, se procede a realizar un suministro de agua a las balsas. Para ello ADORdecisión analiza horariamente la capacidad de la red para realizar dicho suministro, de igual manera que durante

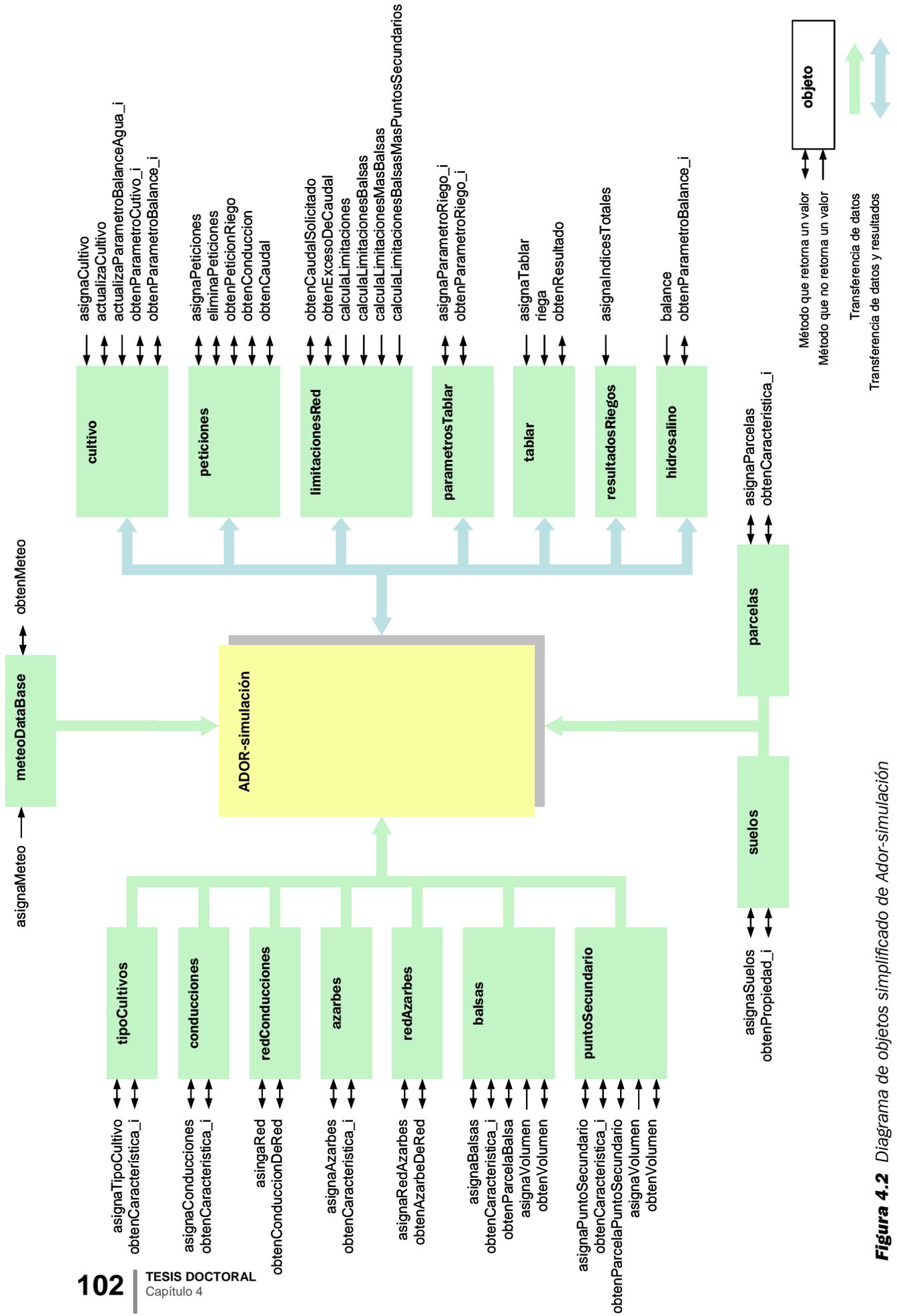
el periodo de operación de la red, aunque teniendo en cuenta en el primer criterio de preferencia únicamente las parcelas que ya han iniciado el riego.

#### 4.2.6 Implementación informática del modelo

ADOR-simulación ha sido desarrollado utilizando el lenguaje de programación C++. La potencia de este lenguaje consiste en su capacidad para el cálculo estructurado mediante la representación de los objetos que se pretenden simular. Mediante el mismo se pueden representar tanto la parte física como la funcional de los objetos a partir de la definición de variables, que describen las partes de los objetos, así como de métodos, que reproducen las funciones que pueden realizar los mismos. Esta forma de programación orientada a objetos facilita la implementación informática de complejos modelos de simulación, al permitir estandarizar el código así como compartimentalizarlo en módulos independientes.

Un ejemplo de esta forma de programación en ADOR-simulación sería el objeto denominado “tablar”. Como variables de este objeto se han definido tanto sus características intrínsecas (datos sobre el tablar) como los resultados de las diferentes funciones del mismo. Dichas variables son las características geométricas, su pendiente, su desviación estándar de la elevación, los parámetros de la ecuación de infiltración de su suelo, su disponibilidad de provisión de escorrentía, el número de nudos de cálculo a considerar en la simulación del riego, así como el resultado de dicha simulación. Como métodos del tablar se han definido la acción de regar, así como la de almacenar los datos descriptivos del tablar en las variables correspondientes, u obtener el resultado del riego de la variable donde se ha almacenado. Mediante la definición de este objeto con sus variables y métodos se constituye el código estándar al que se referirán de forma inequívoca todos los tablares que se consideren en una simulación, lo que asegura la homogeneidad del código y facilita la labor de programación.

En la Figura 4.2 se muestra un diagrama simplificado con una distinción funcional de los objetos contemplados en la implementación informática de ADOR-simulación. En el mismo se distinguen los diferentes métodos de cada objeto. Aquellos métodos en cuyo nombre se antepone la palabra “asigna” transfieren valores a las variables de los objetos, mientras que los métodos con la palabra “obten” devuelven los valores almacenados en las mismas. Mediante la letra *i* se indica que son varios los métodos que hacen referencia a un mismo tipo de función aplicada a diferentes variables.



**Figura 4.2** Diagrama de objetos simplificado de Ador-simulación

### 4.3 Ejemplo de aplicación

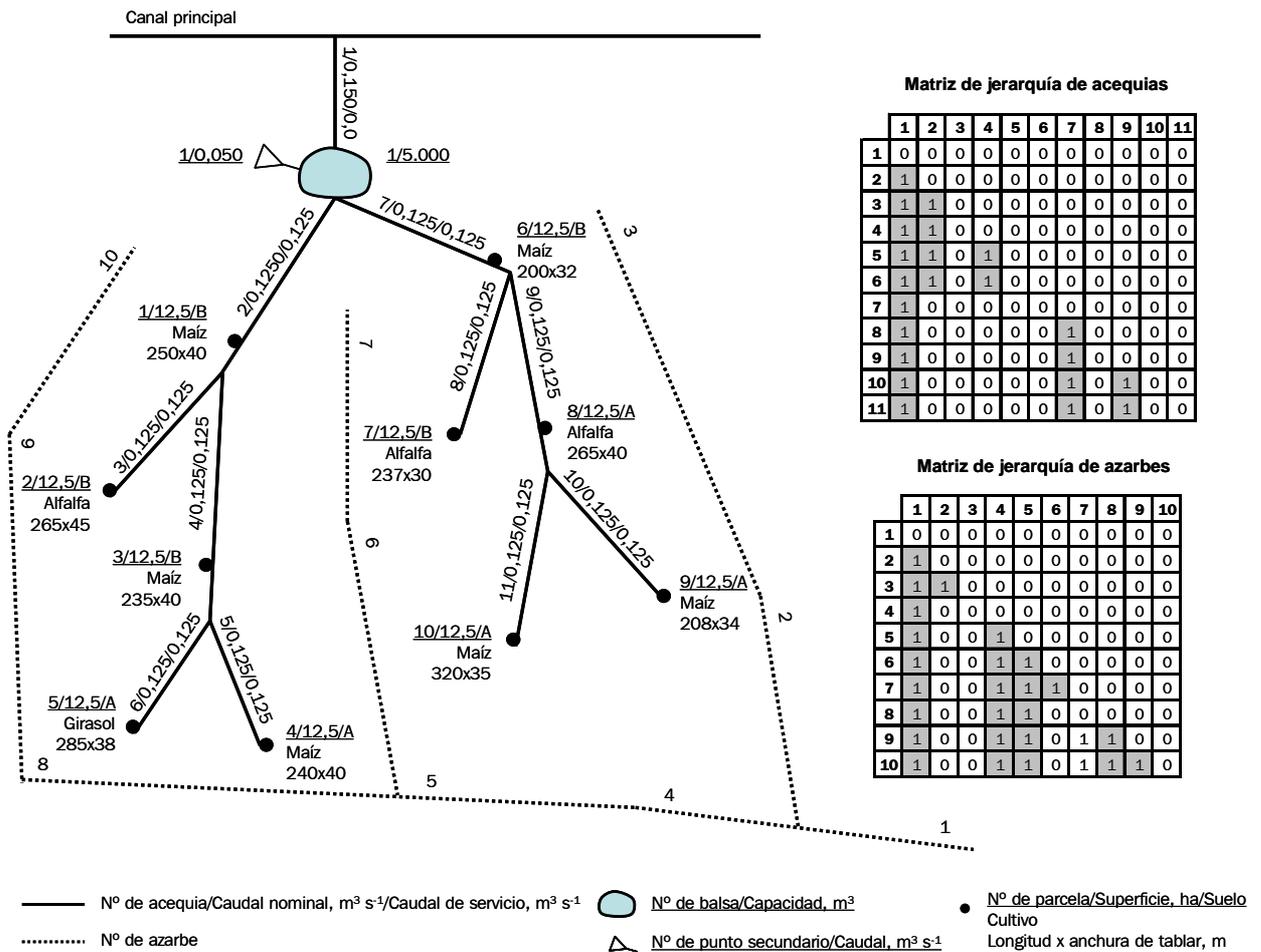
Para demostrar las utilidades de ADOR-simulación se expone a continuación un ejemplo de aplicación en una comunidad de regantes hipotética para un año civil. Esta comunidad tiene una superficie de 125 ha, y su representación esquemática puede observarse en la Figura 4.3. Comprende un total de diez parcelas divididas en diferentes tablares de riego con posibilidad de escurrentía. En esta comunidad existen dos tipos de suelos. El suelo de tipo A se caracteriza por la homogeneidad espacial de sus propiedades, que son una profundidad efectiva de 1,20 m en todas las parcelas, una textura franca, una conductividad eléctrica (CE) del extracto saturado de 0,9 dS m<sup>-1</sup> (25 °C) y 182 mm de CRAD media. El tipo de suelo B es más heterogéneo, con una profundidad efectiva media de 0,77 m, una textura ligeramente más gruesa que el anterior, una CE de 0,5 dS m<sup>-1</sup> (25 °C) y 65 mm de CRAD media. A partir de estos datos se ha considerado una dosis requerida de 72 mm para todas las parcelas con suelos aluviales. Sin embargo, dada la escasa CRAD de los suelos de plataformas, en las parcelas situadas sobre esta unidad se ha tomado como dosis requerida la totalidad de la CRAD, considerando además su variabilidad. Así, a cada punto de simulación se le ha asignado un valor de dosis requerida según una distribución estadística normal de media 65 mm y desviación estándar de 32 mm.

Las ecuaciones de infiltración de Kostiakov para los suelos A y B son las siguientes:

$$\begin{aligned} Z_A &= 0,015 \tau^{0,31} \\ Z_B &= 0,010 \tau^{0,45} \end{aligned} \quad [4.9]$$

donde  $Z$  es la infiltración acumulada (m) y  $\tau$  es tiempo de oportunidad (min). La pendiente de los tablares está relacionada con el tipo de suelo, siendo de 0,0008 para las parcelas sobre suelos de tipo A y de 0,0012 sobre suelos de tipo B.

El clima para el que se ha realizado la simulación presenta una precipitación anual de 416 mm y una evapotranspiración de referencia de 1.088 mm. El listado de datos meteorológicos utilizados se corresponde con la meteorología registrada en la estación meteorológica de la Estación Experimental de Aula Dei (Zaragoza) en 1997. Los cultivos que se dan en la zona simulada son el maíz, la alfalfa y el girasol.



**Figura 4.3** Representación esquemática de la comunidad de regantes y matrices de jerarquía de sus redes hidráulicas

Las infraestructuras de riego están compuestas por una red de acequias de hormigón en masa que, partiendo de un canal principal, cuentan con una capacidad máxima de  $0,150 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  en cabecera, y un caudal de servicio de  $0,125 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Estas magnitudes son insuficientes para garantizar un adecuado suministro de agua a cultivos con elevadas necesidades hídricas. En la cabecera de la red existe una balsa de regulación interna, de  $5.000 \text{ m}^3$  de capacidad, que además de abastecerse del canal principal también puede tomar agua de una pequeña captación en un arroyo próximo ( $0,050 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  durante las horas de riego). Al inicio de la campaña esta balsa se encuentra al nivel de máximo embalse. La conductividad eléctrica del agua de riego, tanto la procedente del canal principal como del arroyo, es de  $0,4 \text{ dS m}^{-1}$  ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

La organización de la distribución de agua es negociada restringida, con caudal fijo correspondiente al de servicio de la acequia de la que se sirve cada parcela. Las peticiones de agua se realizan de forma horaria dentro de una jornada de riego de 16 h.

La red de drenaje está compuesta por desagües que evacuan los retornos de riego de toda la zona. Se considera que toda la percolación profunda que se produce durante el riego de las parcelas aparece en los desagües.

Con esta situación inicial, que se podría corresponder con la de un regadío tradicional español creado a mediados del siglo XX, se han realizado una serie de simulaciones mediante ADOR-simulación. El objetivo ha sido reproducir por una parte la situación inicial, y por otra, un escenario de mejora de la gestión del riego en parcela. De esta forma se ha pretendido determinar la influencia que tienen sobre el funcionamiento del conjunto de la comunidad las decisiones que los agricultores toman durante el riego de sus parcelas.

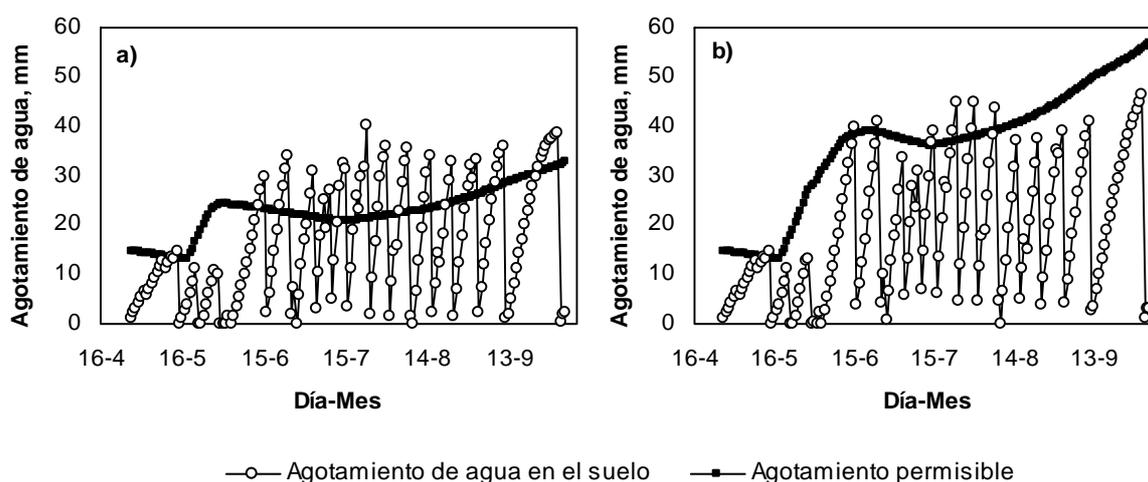
La mejora de la gestión del riego en las parcelas se ha basado en una optimización del tiempo de riego que maximice la eficiencia de aplicación. Para ello se ha utilizado la opción del módulo ADORsuperficie que permite esta optimización, considerando que la dosis requerida debe aplicarse a la totalidad de la superficie de los tablares (totalidad de los puntos de simulación).

El nivel de estrés considerado para que la parcela solicite el riego ha sido aquél en el que el 25 % de los puntos de simulación del cultivo presentan un contenido de humedad en el suelo inferior al permisible. Los puntos sobre los que se ha efectuado la simulación del riego por superficie han sido 50, de los cuales 12 se han escogido para la simulación de los cultivos.

El criterio de preferencia seguido para la toma de decisiones en la distribución se ha basado exclusivamente en el número de días consecutivos que las parcelas solicitan agua. Este criterio se ha aplicado tanto en la situación actual como en la optimizada.

En primer lugar se muestran los resultados del modelo que proporcionan la evolución de diversas variables durante la campaña de riego en la solución optimizada. En la Figura 4.4 se representa la evolución de los niveles de agotamiento de agua en el suelo y de agotamiento permisible en la parcela número uno, con un cultivo de maíz. En la gráfica de la izquierda de la Figura 4.4

los valores representados de las variables se corresponden con la media del 25 % de los puntos más estresados. En la misma se pueden distinguir los eventos de riego y lluvia, así como los días en los que el cultivo ha sufrido estrés hídrico como consecuencia de la escasa capacidad de la red de distribución que no ha podido satisfacer su demanda de agua.

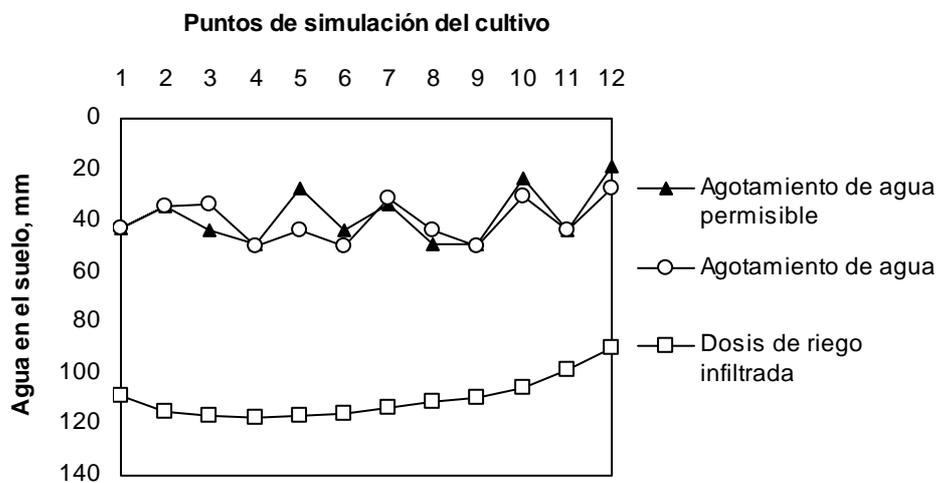


**Figura 4.4** Evolución del agotamiento de agua en el suelo y del nivel de agotamiento permisible para el cultivo de maíz de la parcela número 1. a) Media del 25 % de los puntos de simulación más secos; b) Media de todos los puntos de simulación

En la gráfica de la derecha de la Figura 4.4 se muestran las mismas variables pero como media de los 12 puntos de simulación. Al final de la campaña se observa cómo la menor demanda evaporativa provoca que el retraso en el riego afecte en menor medida al conjunto de los puntos de simulación. La diferencia entre ambas figuras refuerza la importancia del uso de varios puntos de cálculo, de tal manera que permitan considerar la variabilidad espacial existente en el tablar.

Observando la Figura 4.4 se puede comprobar cómo el 15 de junio se aplica un riego en la parcela número 1. Este riego se produce tras tres días consecutivos en los que el cultivo venía sufriendo estrés hídrico, dado que la red de distribución no le podía servir agua al estar saturada por peticiones previas. En la Figura 4.5 se muestra el riego optimizado correspondiente a dicho día, representando en cada punto de cálculo la dosis de agua infiltrada, el agotamiento de agua del suelo y el nivel de agotamiento permisible del mismo, todo ello

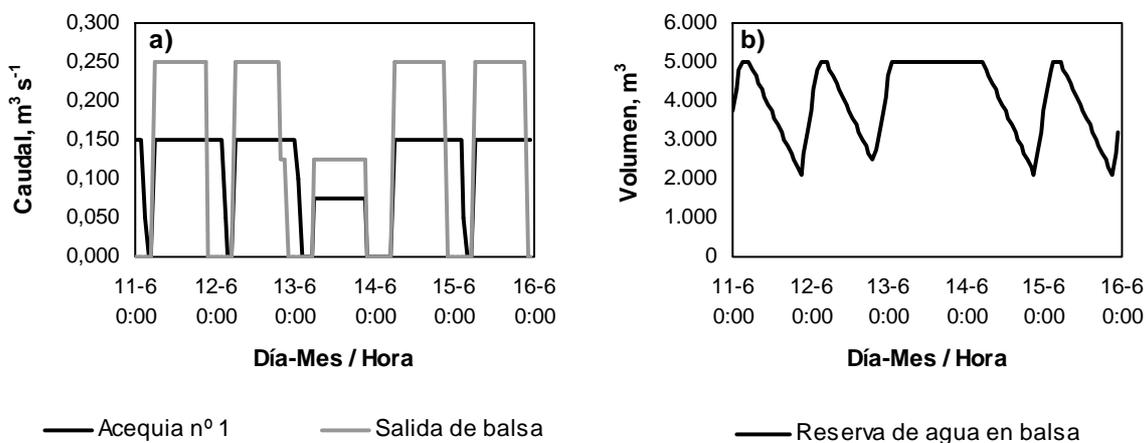
teniendo en cuenta la variabilidad de la CRAD. Puede comprobarse como en más de tres puntos (5, 6, 10 y 12) el agotamiento de agua del suelo es superior al nivel permisible, justificando la petición de agua de riego. En la Figura 4.5 destaca la falta de ajuste entre la dosis de agua aplicada y el agotamiento del suelo. Esta diferencia, que provoca una baja eficiencia de aplicación (37 %), se debe a la elevada infiltración del suelo, que impide cortar el agua con anterioridad si se quiere asegurar que el frente de avance alcance el final del tablar. Esta no es una situación extraña en el riego por superficie en el valle del Ebro (Playán et al. 2000).



**Figura 4.5** Dosis de agua infiltrada y niveles de agotamiento actual y permisible en el evento de riego producido el día 15 de junio en la parcela número 1

La evolución de la reserva de agua almacenada en la balsa de regulación y los caudales de entrada y salida a la misma se muestran en la Figura 4.6 para un intervalo de cinco días entre el 11 y el 16 de junio. La evolución de los caudales de entrada y salida difiere según los días en función de las peticiones de agua de riego de las parcelas que son atendidas. Durante el día 11 se abastecen dos parcelas de forma simultánea (parcelas 3 y 8), al igual que el día 12, aunque en las dos últimas horas de la jornada de riego la salida de la balsa reduce su caudal a la mitad como consecuencia de la finalización del riego en una de las parcelas (número 8). Al día siguiente únicamente riega una parcela (la número 2), mientras que los dos últimos días del periodo mostrado vuelven a regar de forma simultánea dos parcelas (el día 14 las número 2 y 9, y el día 15 las número 1 y

9). El caudal de entrada a la balsa desde el canal principal permanece constante en los  $0,150 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  de capacidad máxima de la acequia número 1 durante 22 horas al día. Con este caudal, junto con el proveniente de la captación del arroyo durante la jornada de riego ( $0,050 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) se asegura el restablecimiento del nivel de máximo embalse de la balsa antes de que se inicie la correspondiente jornada de riego. Durante el día en el que únicamente se abastece una parcela, el caudal de entrada desde el canal principal se reduce a  $0,075 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , de manera que junto al caudal de la captación se asegura dicho abastecimiento sin que varíe el nivel de la balsa.



**Figura 4.6** Evolución en el tiempo de a) los caudales de la acequia número 1 (entrada de la balsa) y de salida de la balsa de regulación, y b) del nivel de agua almacenada en la misma. El periodo de tiempo comprende del 11 al 16 de junio

La Tabla 4.1 muestra varios índices comparativos de los dos escenarios simulados con ADOR-simulación. En la misma se puede observar el efecto positivo que ha tenido la mejora de la gestión del riego en parcela. Tal efecto ha incidido en los regantes tanto directamente, al reducir en casi una hora el tiempo de riego unitario, como indirectamente, al permitir un mejor funcionamiento de la comunidad de regantes. Este mejor funcionamiento se ha debido al hecho de mejorar la eficiencia de riego como consecuencia de la reducción del tiempo de corte. Al haber actuado únicamente a escala de parcela la eficiencia de distribución no ha variado. Este incremento de la eficiencia ha hecho que la demanda total de agua disminuyese al reducirse los retornos de riego, por lo que el volumen de agua transportado por la red de distribución ha sido menor. Como

consecuencia de ello se ha proporcionado un mejor servicio a los regantes, y se ha reducido el tiempo de espera entre la solicitud del agua y la concesión de la misma. Este menor tiempo de espera ha supuesto a su vez la reducción del estrés hídrico de los cultivos y, por lo tanto, un incremento de su evapotranspiración real y de su producción.

**Tabla 4.1** Algunos índices de evaluación de los dos escenarios simulados con ADOR-simulación

	Escenario Actual	Escenario Optimizado
Tiempo de riego unitario, h ha <sup>-1</sup>	2,74	1,92
Reducción de rendimiento, %	14,6	7,7
Eficiencia de riego, %	34,3	44,4
Eficiencia de distribución, %	98,0	98,0
Demanda unitaria de agua, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	14.990	12.251
Demanda de agua, hm <sup>3</sup>	1,91	1,56
Demanda abastecida por arroyo, %	23,0	25,0
Evapotranspiración de cultivos, hm <sup>3</sup>	0,77	0,81
Retornos de lluvia y riegos, hm <sup>3</sup>	1,51	1,13
Masa de sales exportada, t	755	659
Conductividad eléctrica de los retornos, dS m <sup>-1</sup> (25 °C)	0,78	0,91

Otra consecuencia del incremento de la eficiencia de riego, y por tanto, de la reducción de las pérdidas por percolación, ha sido la reducción de la masa de sales exportada. No obstante, esta reducción ha sido en menor proporción que la de los retornos de riego, por lo que a la salida de la comunidad la conductividad eléctrica del agua evacuada por los desagües se incrementa ligeramente.

A pesar de la mejora que ha supuesto la optimización de la gestión del riego en parcela, la reducida CRAD de los suelos de la comunidad impide alcanzar niveles de eficiencia razonables.

## 4.4 Conclusiones

El modelo ADOR-simulación en su orientación al riego por superficie permite simular los flujos de agua que se producen en una comunidad de regantes, interrelacionando las múltiples variables que afectan al aprovechamiento del agua, la producción agraria y al medio ambiente en un sistema agrario de regadío. Esta capacidad le permite ser utilizado para la evaluación de diferentes alternativas de gestión y planificación, prediciendo la respuesta del sistema desde la parcela hasta el conjunto de la comunidad de regantes. La incorporación de un módulo para la simulación del riego por superficie, y su interacción con el módulo de simulación de cultivos, resulta fundamental en este sentido. Ésto es debido a la capacidad de simular la distribución espacial del estrés hídrico a escala de unidad de riego, y su influencia sobre las peticiones de agua, considerando de esta manera la gestión del riego en parcela en el funcionamiento de la comunidad de regantes.

El modelo puede constituir así una valiosa herramienta para el apoyo en la toma de decisiones sobre la mejora de la gestión y planificación de comunidades de regantes, al igual que en procesos de modernización de sus infraestructuras hidráulicas. No obstante, la utilización del modelo requiere una gran cantidad de datos cuya obtención implica la realización de un amplio estudio de los condicionantes naturales y humanos que intervienen en el uso del agua en la comunidad de regantes que se pretenda simular. El uso combinado del modelo con ADOR-gestión le permitirá acceder a dicha información ya sistematizada y actualizada.

Las capacidades descritas de ADOR-simulación deben ser verificadas mediante la aplicación del mismo en situaciones reales para determinar la fiabilidad de sus resultados y realizar las calibraciones necesarias.

En el estado actual de desarrollo del modelo se han establecido las relaciones entre los módulos de simulación que permiten reproducir los flujos de agua en una comunidad de regantes. Estas relaciones constituyen la base sobre la que poder incorporar nuevos módulos y utilidades en un futuro. La ampliación de los sistemas de organización de la distribución de agua que contempla, la realización de estimaciones económicas, la generalización de los resultados del balance hidrosalino, o la incorporación de un módulo de simulación de cultivos más avanzado que permita estimar pérdidas de nitratos o el efecto de la salinidad sobre la producción, pueden ser algunos ejemplos. La vinculación automática de

los resultados del modelo a un SIG como en el caso de ADOR-gestión también constituye un objetivo para próximos desarrollos del programa.

## 4.5 Referencias

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper n° 56. FAO. Roma (Italia). 300 pp.

Burt, C.M., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., Solomon, K.H., Bliesner, R.D., Hardy L.A., Howell, T.A., Eisenhauer, D.E. 1997. Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. *J. Irrig. Drain. Engrg.*, ASCE, 123(6), 423-442.

Burt, C.M., Styles, S.W. 1999. Modern water control and management practices in irrigation. Impact on performance. FAO Water Reports No. 19. FAO. Roma (Italia). 223 pp.

Cavero, J., Farré, I., Debaeke, P., Faci, J.M. 2000. Simulation of maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT models. *Agron. J.* 92(4), 679-690.

Chávez-Morales, J., Mariño, M.A., Holzapfel, E.A. 1987. Planning model of irrigation district. *J. Irrig. Drain. Engrg.*, ASCE, 113(4), 549-564.

Chávez-Morales, J., Mariño, M.A., Holzapfel, E.A. 1992. Planning simulation model of irrigation district. *J. Irrig. Drain. Engrg.*, ASCE, 118(1), 74-87.

Clemmens, A.J. 1987. Delivery system schedules and required capacities. En: *Planning, operation, rehabilitation and automation of irrigation water delivery systems*. Portland (EE.UU.). pp. 18-34.

Cuenca, R.H., 1989. *Irrigation system design: an engineering approach*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs. New Jersey (EE.UU). 552 pp.

Dechmi, F., Playán, E., Cavero, J., Martínez-Cob, A., Faci, J.M. 2004. A coupled crop and solid set sprinkler simulation model: I. Model development. *J. Irrig. Drain. Engrg.*, ASCE (en prensa).

Doorenbos, J., Kassam, A.H. 1979. Yield response to water. FAO Irrig. and Drain. Paper n° 33. FAO. Roma (Italia). 212 pp.

Ferguson, C.A. 1989. Modeling water utilization in large-scale irrigation systems: a quantitative response approach. *Water. Resour. Bull.*, 25(6), 1199-1204.

Gallagher, J.N. 1979. Field studies of cereal leaf growth: I. Initiation and expansion in relation to temperature and ontogeny. *J. Exp. Bot.* 30, 625-636.

Hall, A.W. 1999. Priorities for irrigated agriculture. *Agric. Wat. Manage.*, 40, 25-29.

Hazrat Ali, Md., Lee Teang Shui, Walker W.R. 2003. Optimal water management for reservoir based irrigation projects using Geographic Information System. *J. Irrig. Drain. Engrg., ASCE*, 129(1), 1-10.

Khepar, S.D., Gulati, H.S., Yadav, A.K., Brar, T.P.S. 2000. A model for equitable distribution of canal water. *Irrig. Sci.* 19(4), 191-197.

Kuo, S.F., Merkley, G.P., Liu, C.W. 2000. Decision support for irrigation Project planning using a genetic algorithm. *Agric. Wat. Manage.*, 45, 243-266.

Labbé, F., Ruelle, P., Garin, P., Leroy, P. 2000. Modelling irrigation scheduling to analyse water management at farm level, during water shortages. *Europ. J. Agronomy*, 12, 55-67.

Lamacq, S. 1997. Coordination entre l'offre et la demande en eau sur un perimetre irrigue. Des scenarios, des systemes, et des hommes... Tesis doctoral. CEMAGREF. Montpellier (Francia). 111 pp.

Lecina, S., Playán, E., Cavero, J. 2001. Ador: un programa para la simulación de los flujos de agua en comunidades de regantes. En: XIX Congreso Nacional de Riegos, Confederación Hidrográfica del Ebro (Eds.), 12-14 Junio 2001, en Zaragoza (España). pp. 167-168.

Lozano, D., Mateos, L. (2003). Application of SIMIS to the BXII Irrigation Scheme, in the Lower Guadalquivir Valley, Spain. En: *Envirowater 2003*. VI Inter-regional conference on environment-water. Land and water use planning and management, Tarjuelo, J.M., Martín de Santa Olalla, F., Pereira, L.S. (Eds.). Albacete (España). pp. 144-146.

Mateos, L., Young, C.A., Wallender, W.W., Carlson, H.L. 2000. Simulating spatially distributed water and salt balances. *J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE*, 126(5), 288-295.

Mateos, L., López-Cortijo, I., Sagardoy, J.A. 2002. SIMIS: the FAO decision support system for irrigation scheme management. *Agric. Wat. Manage.*, 56, 193-206.

Merkley, G.P. 1994. Planning Distribution Model. A simulation tool for water management planning in large-scale irrigation and drainage networks. User's Guide. Biological and Irrigation Engineering Department, Utah State University. Logan (EE.UU.). 104 pp.

Nielsen, D.C., Hinkle, S.E. 1996. Field evaluation of basal crop coefficients for corn based on growing degree days, growth stage, or time. *Trans. ASAE*, 39(1), 97-103.

Playán, E., Walker, W.R., Merkley, G.P. 1994. Two-dimensional hydrodynamic simulation of basin irrigation. I: Theory. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE. 120(5), 837-856.

Playán, E., Faci, J.M., Serreta, A. 1996. Characterizing microtopographical effects on level-basin irrigation performance. *Agric. Wat. Manage.*, 29, 129-145.

Playán, E., Slatni, A., Castillo, R., Faci, J.M. 2000. A case study for irrigation modernisation: II. Scenario Analysis. *Agric. Wat. Manage.*, 42, 335-354.

Porta, J., López-Acevedo, M., Roquero de Laburu, C. 1999. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid (España). 849 pp.

Prajamwong, S., Merkley, G.P., Allen, R.G. 1997. Decision support model for irrigation water management. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, 123(2), 106-113.

Quílez, D. 1999. La salinidad en las aguas superficiales de la Cuenca del Ebro: Análisis del impacto Potencial del regadío de Monegros II. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria. Universidad de Lleida. Lérida (España). 352 pp.

Smith, M. 1992. CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management. *FAO Irrig. and Drain. Paper n° 46*. FAO. Roma (Italia). 126 pp.

Stewart, J.I., Misra, R.D., Pruitt, W.O., Hagan, R.M. 1975. Irrigation corn and grain sorghum with a deficient water supply. *Trans. ASAE*, 18, 270-280.

Suryavanshi, A.R., Reddy, J.M. 1986. Optimal operation schedule of irrigation distribution systems. *Agric. Wat. Manage.*, 11, 23-30.

Tanji, K., Donneen, L.D., Ferry, G.U., Ayers, R.S. 1972. Computer simulation analysis on reclamation of salt-affected soils in San Joaquín Valley, California. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 36(1), 127-133.

Tanji, K.K. 1977. A conceptual hydrosalinity model for predicting salt load in irrigation return flows. *Managing saline water for irrigation*. Texas Tech. University. Lubbock (EE.UU.). pp 49-65.

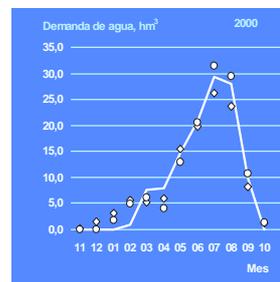
Vidal, A., Comeau, A., Plusquellec, H., Gabelle, F. 2001. Case studies on water conservation in the mediterranean region. FAO. Roma (Italia). 52 pp.

Walker, S.H. 1999. More from less – better water management: issues and future policy. *Agric. Wat. Manage.*, 40, 135-138.

Walker, W.R., Skogerboe, G.V. 1987. *Surface irrigation. Theory and practice*. Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs. New Jersey (EE.UU.). 386 pp.

Yamashita, S., Walker, W.R. 1994. Command area water demands. Part I. Validation and calibration of UCA model. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, 120(6), 1025-1042.

Zapata, N., Playán, E., Faci, J.M. 2000. Water reuse in sequential basin irrigation. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, 126(6), 362-370.



**ADOR-simulación, UN MODELO PARA LA  
SIMULACIÓN DE LOS FLUJOS DE AGUA EN  
COMUNIDADES DE REGANTES:  
APLICACIÓN DEL MODELO**

◀ **Demandas de agua observada y simulada con ADOR-simulación** en el año 2000 en la Comunidad de Regantes V

## 5.1 Introducción

La Comunidad de Regantes V del Canal de Bardenas (CRV), de 15.545 ha de superficie, es un ejemplo de regadío susceptible de modernización en el ámbito de actuaciones del Plan Nacional de Regadíos. Tal como se describe en el Capítulo 3, su transformación se produjo en el año 1959, tras la puesta en servicio del embalse de Yesa en el río Aragón. Sus infraestructuras de distribución de agua para riego por superficie datan de los primeros años sesenta del siglo pasado, al igual que la gran mayoría de la zona regable del Canal de Bardenas.

La red de acequias, que se diseñó en su día para el abastecimiento mediante riegos de apoyo de cereales de invierno, se ha mantenido hasta la actualidad con escasas modificaciones. Sin embargo, la alternativa de cultivos que se viene practicando desde el último cuarto del siglo XX se basa en la producción de cultivos extensivos de verano, principalmente maíz y alfalfa. Las importantes necesidades hídricas de estos cultivos en comparación con los cereales de invierno han generado un acusado incremento de la demanda de agua de la zona, lo que produce la saturación de la red de transporte durante los meses estivales.

En dichos meses se establece un régimen de distribución de agua rotacional de frecuencia variable (Clemmens, 1987). La jornada de riego es de 24 h, y el intervalo entre riegos (o duración del turno de riego) con frecuencia pone a prueba la capacidad de resistencia al estrés hídrico de los cultivos. De esta forma se pretende aprovechar al máximo la capacidad de transporte de las acequias con el fin de cultivar la mayor superficie posible de cultivos de verano. Con el mismo objetivo la comunidad también ha llevado a cabo diferentes

actuaciones para realizar un reaprovechamiento de las aguas de retorno de riego mediante la conexión de la red de desagüe y la de distribución. A pesar de ello, aproximadamente un 20 % del área regable de la comunidad, según los años, debe reservarse a cultivos de invierno o no cultivarse, dada la imposibilidad de que la totalidad de la misma pueda ser abastecida por la red de acequias durante el verano.

Esta situación se ve agravada por el hecho de que el 71 % de sus suelos presentan una elevada tasa de infiltración y una reducida capacidad de retención de agua disponible (*CRAD*) (véase el Capítulo 3). Por otro lado, los regantes tienden a aplicar una dosis de riego superior a la necesaria con el fin de asegurar que la totalidad del tablar quede completamente regado. Sin embargo, como se comprobó en el Capítulo 3, esta agua aplicada en exceso no repercute en un mejor abastecimiento hídrico de los cultivos, y provoca, por el contrario, una prolongación del intervalo entre riegos (hasta 12-14 días) que perjudica el funcionamiento de un ya muy limitado sistema de distribución de agua.

Asimismo, la zona regable del Canal de Bardenas en la que se ubica la CRV presenta limitaciones recurrentes en la disponibilidad de agua a lo largo de los años. Este hecho provoca que con frecuencia se produzcan restricciones de agua a la finalización de la campaña. Asimismo, cada cierto intervalo de tiempo se repiten campañas en las que dichas restricciones se padecen desde el inicio del periodo de riego, lo que afecta muy seriamente a la planificación y el rendimiento de los cultivos.

Las actuaciones de modernización que los regantes de la zona regable del Canal de Bardenas han puesto en marcha hasta la fecha han sido mayoritariamente destinadas a la mejora de la regulación interna del sistema. Así, se han construido o están en proceso de ejecución tres embalses laterales en el Canal de Bardenas que suman una capacidad de 48,3 hm<sup>3</sup>: Malvecino (6,0 hm<sup>3</sup>), Carcastillo (5,3 hm<sup>3</sup>) y La Verné (37,0 hm<sup>3</sup>). Las actuaciones de sustitución de los sistemas de riego actuales por sistemas presurizados no han sido prioritarias hasta el momento. Por ello el proceso de modernización de la CRV parece hasta el momento orientado al mantenimiento del riego por superficie.

La gran cantidad de factores que influyen en una modernización (agronómicos, hidráulicos, económicos, sociológicos, medioambientales...) hacen del mismo un proceso complejo. Por este motivo herramientas tales como

modelos de simulación o Sistemas de Información Geográfica (SIG) se hacen imprescindibles para analizar de forma ágil múltiples soluciones alternativas.

Con el propósito de apoyar la toma de decisiones en la planificación y gestión de regadíos se ha desarrollado el programa informático denominado ADOR-simulación, descrito en el Capítulo 4. Mediante el mismo se pretende reproducir la interacción entre los distintos factores que influyen en el uso del agua, la producción agraria o el medio natural en un sistema agrícola de regadío. Para ello el programa se compone de diferentes módulos que, trabajando de forma interactiva, reproducen los flujos de agua que se dan en una comunidad de regantes durante un determinado periodo de tiempo (por ejemplo un año). Dichos módulos simulan el riego por superficie (ADORsuperficie), el crecimiento de los cultivos (ADORcultivos), el funcionamiento de las infraestructuras hidráulicas (ADORred), el balance hidrosalino (ADORhidrosalino) o la toma de decisiones en el reparto del agua (ADORdecisión).

En el presente Capítulo se ha pretendido poner de manifiesto las utilidades de ADOR-simulación, tanto en el ámbito técnico como en el científico, mediante su aplicación práctica en la CRV. De esta forma se ha generado información para apoyar la toma de decisiones por parte de la propia CRV respecto al proceso de modernización de su regadío tradicional. En este sentido se ha tenido en cuenta la preferencia de los agricultores por mantener el riego por superficie allí donde sea posible. Asimismo, y desde una perspectiva científica, se ha determinado la influencia que la precisión en la estimación de la  $ET_0$  puede tener sobre el funcionamiento de la CRV.

Para conseguirlo ha sido preciso en primer lugar llevar a cabo una calibración y posterior validación del modelo. Estos procesos se realizaron a partir de los datos disponibles en la CRV sobre las campañas de riego de los años 2000 y 2001.

Posteriormente se evaluaron desde diferentes perspectivas dos alternativas de mejora: una basada exclusivamente en la mejora de la gestión, y otra en la que además se lleva a cabo una mejora de las infraestructuras de riego. El planteamiento de dichas alternativas de mejora no ha pretendido ser exhaustivo, sino que sirve al propósito de poner de manifiesto la aplicabilidad del programa en la planificación y gestión del regadío. Mediante las mismas también se ha querido analizar la influencia que factores como el tiempo de riego o el reaprovechamiento de los retornos de riego tienen sobre el funcionamiento de la CRV.

Finalmente, se analizó la influencia que pequeñas variaciones en la estimación de la  $ET_o$  pueden tener en la CRV. Para ello se evaluó la respuesta de variables como la demanda total de agua, la eficiencia de riego, y la reducción de rendimiento de los cultivos para el conjunto de la comunidad. De esta forma se cuantificó la incidencia que en un sistema agrario de regadío pueden tener las investigaciones científicas que pretenden mejorar la estima de esta variable hidrológica.

## 5.2 Caracterización del periodo de estudio

La aplicación del modelo se llevó a cabo durante las campañas de riego de los años 2000 y 2001. Las condiciones meteorológicas que se produjeron durante estas dos campañas fueron diferentes, lo que permitió analizar el comportamiento del modelo en dos situaciones de demanda de agua distintas. Así, en el año 2000 la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ), calculada según la ecuación de Penman-Monteith, (1.085 mm) se correspondió con un año medio (50 % de probabilidad de no excedencia, *PNE*) mientras que la precipitación (533 mm) fue propia de un año húmedo (92 % de *PNE*). Por el contrario, el año 2001 se caracterizó por una mayor  $ET_o$  (1.114 mm, correspondiente a un 65 % de *PNE*) y una escasa precipitación (276 mm, correspondiente a un 1 % de *PNE*). Los datos meteorológicos para los años de estudio fueron registrados por una estación agrometeorológica automática instalada al efecto en la zona, mientras que la caracterización climática se realizó a partir de los datos del período 1965-1994, disponible en la Estación Meteorológica de Santa Anastasia. Las características y localización de ambas estaciones se encuentran descritas en el Capítulo 3.

Por otra parte, también se debe destacar por su influencia la elevada pluviometría registrada durante el otoño-invierno de 2000 (210 mm entre noviembre de 2000 y febrero de 2001, mientras que la correspondiente media histórica se sitúa en 133 mm). Este hecho impidió la siembra de cereal de invierno a los agricultores de la comunidad que no la habían iniciado antes del comienzo de las lluvias. Como consecuencia, se produjo un acusado descenso de la superficie de estos cultivos durante la campaña de 2001, que resultó ser menos de la mitad que la de 2000. En contrapartida, los cultivos de verano como el maíz o la alfalfa incrementaron sus superficies hasta alcanzar el 75 % del área cultivada de la CRV durante 2001 (Tabla 5.1). Este hecho, junto a las

características meteorológicas del año 2001, provocó que las demandas de agua de la CRV pasaran de 146,5 hm<sup>3</sup> en 2000 a 155,9 en 2001, según la propia CRV.

**Tabla 5.1** Superficies de cultivo (ha) por sectores en la CRV durante las campañas de riego de 2000 y 2001

Sector	Maíz		Alfalfa y otros forrajes		Girasol		Cultivos de invierno <sup>(1)</sup>		Hortalizas <sup>(2)</sup>		Arroz		Total	
	2000	2001	2000	2001	2000	2001	2000	2001	2000	2001	2000	2001	2000	2001
XVIII	594	707	826	858	77	81	170	58	77	44	71	65	1.814	1.814
XIX	722	957	1.008	1.088	122	63	326	201	38	22	78	88	2.293	2.419
XXIV	133	273	152	165	126	130	256	69	3	3	60	77	730	718
XXV	164	300	366	374	98	84	167	11	9	9	173	200	978	978
XXVI	431	494	367	442	157	132	135	69	64	44	120	138	1.274	1.320
XXVII	125	134	197	222	3	25	81	37	13	2	55	55	475	475
XXVIII	481	552	374	374	17	22	43	13	102	68	0	0	1.016	1.029
XXIX	268	309	423	394	31	32	62	61	28	38	0	10	811	845
XXX	490	500	407	413	46	35	101	122	89	62	0	0	1.133	1.133
XXXI	539	557	277	289	52	55	176	81	113	83	0	0	1.157	1.065
XXXII	462	574	864	973	55	60	242	86	68	61	19	20	1.710	1.775
Total	4.407	5.359	5.260	5.593	785	721	1.760	808	603	438	577	652	13.392	13.570

<sup>(1)</sup> Trigo, cebada, veza y guisante.

<sup>(2)</sup> Tomate, pimiento, cebolla y puerro.

### 5.3 Planteamiento de las simulaciones con ADOR-simulación

Las simulaciones efectuadas para los dos años de estudio en la CRV se llevaron a cabo sobre la información generada en los trabajos de campo y gabinete descritos en el Capítulo 3 (gestión del agua en parcela, organización de su distribución en la comunidad, infraestructuras, meteorología, suelos, etc). El periodo de simulación para cada año comprendió los meses de noviembre a octubre, abarcando de esta manera el intervalo de tiempo completo entre las fechas de siembra y cosecha de los diferentes cultivos que se producen en la comunidad.

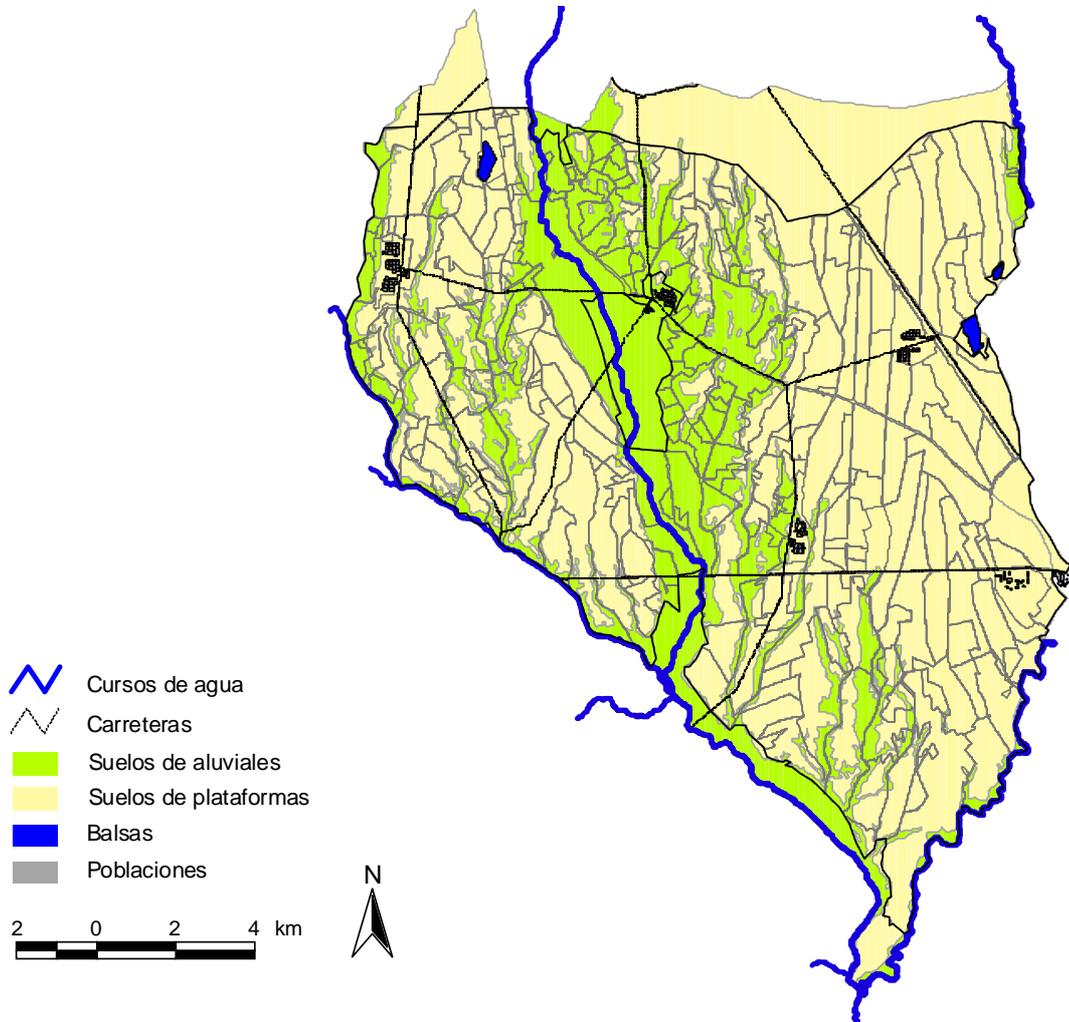
La parcela es la unidad espacial a partir de la cual se simulan los flujos de agua de una comunidad de regantes con ADOR-simulación. En cada parcela se considera una unidad de riego representativa (tablar) donde se simula el riego por superficie, el crecimiento de los cultivos y el balance hidrosalino. Los resultados obtenidos en dicha unidad de riego se extrapolan al conjunto de la parcela en función de su superficie.

Dada la imposibilidad de definir la geometría de las unidades de riego de todas las parcelas de la CRV, se siguió la misma metodología utilizada para la evaluación del riego a escala de comunidad en el Capítulo 3. Así, se tomaron los parámetros de longitud, anchura y pendiente asignados en dicho Capítulo para la unidad de riego tipo representativa de cada una de las áreas con características similares frente al riego en las que se dividió la comunidad. En la CRV se consideraron como dichas áreas lo que los gestores de la comunidad denominan “turno”, entendido como la superficie regada por un mismo módulo de riego y desde una misma acequia cuando se establece el régimen rotacional de reparto de agua entre los agricultores. En la comunidad existen un total de 147 “turnos”, los cuales se agrupan a su vez en 11 sectores (Figuras 5.1 y 5.2).

En cada uno de dichos “turnos” existe un número variable de parcelas. Dichas parcelas, a diferencia de la evaluación llevada a cabo en el Capítulo 3, se deben considerar al pretender simular los flujos de agua en la CRV mediante ADOR-simulación.

El número y superficie de las parcelas pertenecientes a cada uno de los 147 “turnos” de la CRV se obtuvo a partir del estudio de la base de datos que usa la comunidad para su propia gestión. Del mismo modo se obtuvieron los cultivos que para cada uno de los años estudiados se cultivaron en cada parcela. En total se contabilizaron 1.619 parcelas, cifra que resulta ser una aproximación a la realidad como consecuencia de la unidad territorial utilizada por la CRV para su gestión. En efecto, dicha unidad se corresponde con la superficie agregada que un mismo agricultor gestiona en cada uno de los “turnos”, en lugar del parcelario catastral. De esta manera se reduce la cantidad de datos a tratar en la gestión diaria de la comunidad, dada la intrincada parcelación de la misma y su gran extensión. En cualquier caso, los datos considerados para llevar a cabo las simulaciones representan al conjunto de la CRV, recogiendo su superficie regable y sus cultivos para cada uno de los dos años estudiados. Únicamente se ha descontado un 10 % de la superficie, que al no encontrarse abancalada ni

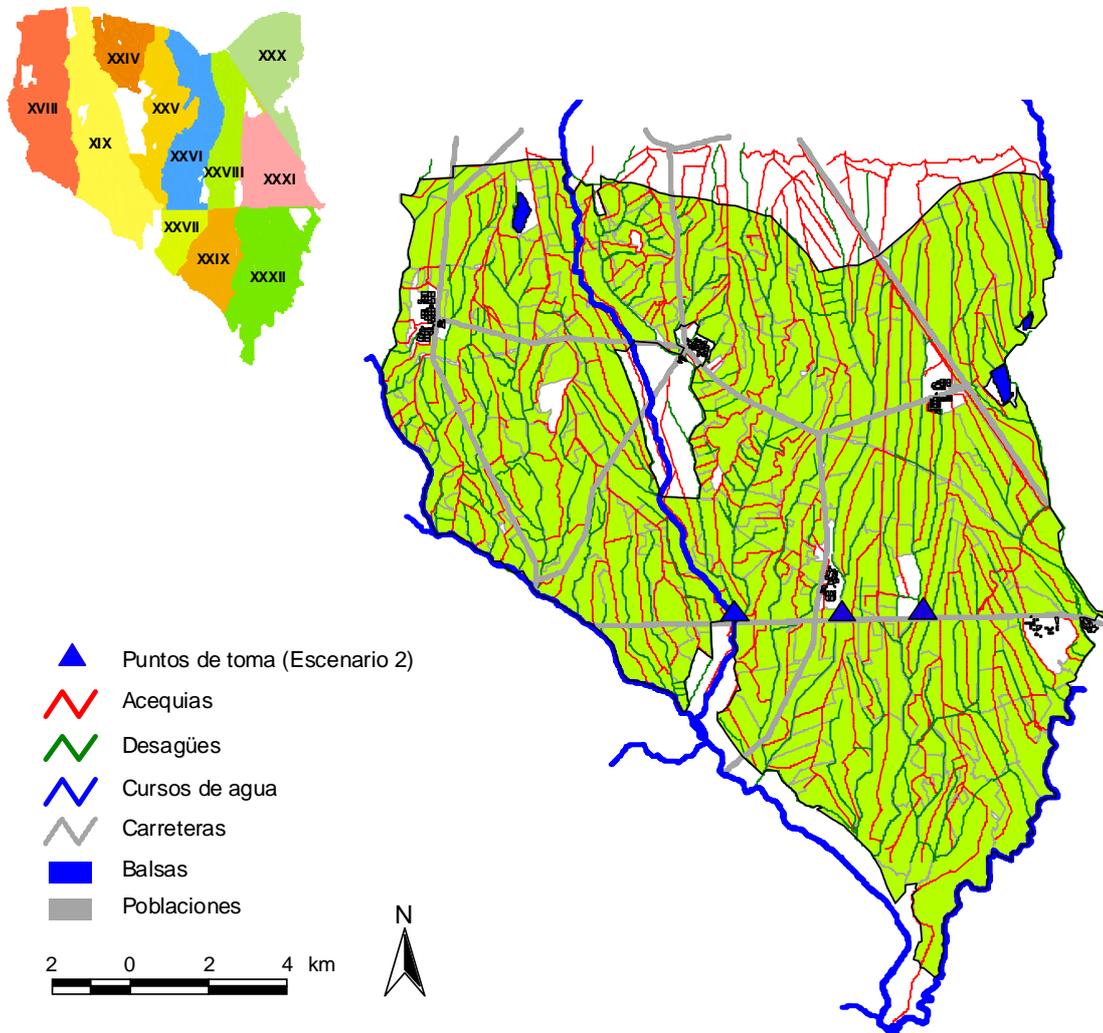
nivelada no se consideró en la realización de las evaluaciones de riego, tal como se indica en el Capítulo 3.



**Figura 5.1** “Turnos” de riego de la Comunidad de Regantes V del Canal de Bardenas (CRV) sobre una adaptación del mapa geomorfológico de la zona elaborado por Basso (1994) a escala 1:25.000

A cada una de las parcelas consideradas se le asignó un tipo de suelo de los dos que se distinguieron en función del estudio geomorfológico de Basso (1994), según se describe en el Capítulo 3. En el momento de llevar a cabo este trabajo únicamente se disponía de la cartografía de los “turnos” y de la geomorfología de la CRV, desarrollada mediante un SIG. Por tanto, la asignación del tipo de suelo a las parcelas consideradas en cada “turno” se llevó a cabo en

función de la superficie ocupada por cada suelo en dichos “turnos” (tal superficie fue determinada en el Capítulo 3).



**Figura 5.2** Infraestructuras y Sectores de la CRV, y puntos de toma para las transferencias de agua entre desagües y acequias planteadas en el Escenario 2

El agotamiento inicial del suelo en cada parcela al comienzo del período de cultivo se estimó en función de las condiciones meteorológicas de las semanas previas a las fechas de siembra. Dichas fechas de siembra se asignaron para el cultivo de cada parcela de forma aleatoria, según la distribución estadística obtenida en los resultados de las encuestas que sobre parámetros de manejo

agronómico llevó a cabo Causapé et al. (2004) en la CRV durante los años 2000 y 2001.

Asimismo, se asignó a cada parcela el tramo de la red de distribución de agua y de la red de desagüe con los que está conectada. De esta manera se localizaron en ambas redes los diferentes puntos de demanda o de aportación de agua, según el caso, de forma que el módulo de simulación de redes ADORred pudiese proceder a la agregación de volúmenes de agua a través de las mismas. La relación entre los diferentes tramos que componen las redes de distribución y de desagüe se modelizó a través del desarrollo de sendas matrices de jerarquía, tal como se indicó en el Capítulo 4. En el caso de la red de distribución, a cada tramo se le asignó un caudal de transporte y un caudal de servicio según el estudio que se llevó a cabo al efecto (véase el Capítulo 3). En total se consideraron 238 tramos de acequias y 156 tramos de desagües. En la Figura 5.2 se muestran las principales acequias y desagües existentes en la CRV.

Al igual que las redes hidráulicas, se parametrizaron los 16 puntos de transferencia de aguas entre la red de desagüe y la de distribución, considerados según los datos disponibles en la comunidad. También se incorporaron los datos referentes a las dos balsas existentes en la CRV (véase el Capítulo 3).

Dentro de cada parcela se llevó a cabo la simulación del crecimiento (acumulación de grados-día) y de las necesidades hídricas del cultivo, así como la simulación del riego por superficie, mediante los módulos ADORcultivos y ADORsuperficie de ADOR-simulación. Dichas simulaciones se realizaron sobre la unidad de riego definida para cada parcela, considerando 12 puntos de cálculo para la simulación del cultivo, y 50 para la del riego por superficie. Se determinó que la solicitud de agua para el riego de una parcela debía producirse al sobrepasarse el agotamiento de agua permisible en el suelo en al menos el 25 % de los puntos de cálculo del módulo de simulación de cultivos. El criterio de preferencia seguido para la toma de decisiones en la distribución del agua entre las parcelas se basó exclusivamente en el número de días consecutivos con petición de agua. Estos criterios se adoptaron por ser cercanos a las observaciones de campo.

En ambos modelos (riego y cultivos) se consideró en los puntos de cálculo la variabilidad espacial de la capacidad de retención de agua disponible del suelo (CRAD), así como la de la profundidad efectiva en el caso del modelo de cultivos. Dicha variabilidad afectó únicamente a los suelos de plataformas residuales, dada

su heterogeneidad, según los resultados del estudio de suelos que se llevó a cabo en la CRV y que se describió en el Capítulo 3. De esta forma, los puntos de cálculo de las unidades de riego de las parcelas con dicho suelo presentaban valores diferentes de *CRAD* y de profundidad efectiva del suelo, coincidiendo su valor medio con el valor medio determinado en el estudio de suelos.

La simulación de los cultivos requirió la introducción en el programa de datos referentes a su fenología, sensibilidad al estrés hídrico y manejo agronómico. Así, la duración de las diferentes fases fenológicas y coeficientes de cultivo para la determinación de la evapotranspiración de cultivo ( $ET_c$ ) se obtuvieron para la zona de los trabajos de Martínez-Cob et al. (1998). La integral térmica total y por fases de cada cultivo, así como los umbrales de temperatura para su cálculo, se obtuvieron a partir de experiencias en condiciones locales (Cavero et al., 2000), así como de otras fuentes (Loomis y Connor, 1992, Maroto, 1990). Los coeficientes de Stewart para la determinación del efecto del estrés hídrico sobre el rendimiento de los cultivos se obtuvieron de los trabajos de Doorembos y Kassam (1979). La duración en grados-día de las diferentes fases del cultivo respecto a este aspecto se determinó a partir de los datos recopilados para el cálculo de la  $ET_c$ . La parametrización del manejo agronómico de los cultivos respecto al riego (riegos de presembrado, siega tras el riego de alfalfa y hierba, etc) se realizó en función de la experiencia local.

En la simulación del riego por superficie en cada parcela se consideró el caudal de servicio del tramo de la red de distribución asignado a la parcela en cuestión. Asimismo, se aplicó un coeficiente de ajuste de 0,03 al caudal de escorrentía simulado por ADORsuperficie bajo la hipótesis de flujo normal. De esta manera se corrigió la estimación del volumen de escorrentía en función de las medidas efectuadas en campo, según se indicó en el Capítulo 3.

Se consideró que la totalidad del volumen de pérdidas de agua por percolación obtenidas en la simulación del riego por superficie era interceptado por la propia red de desagüe de la comunidad. Asimismo, se estimó despreciable la proporción de pérdidas consuntivas sobre el total debidas a la vegetación natural de los desagües. Estas condiciones introducidas en el modelo se basan en los resultados de diversos estudios sobre la cantidad y calidad de las aguas de retorno de riego realizados en la propia CRV (Causapé et al., 2004), y en otras zonas regables del valle del Ebro (Isidoro et al., 2004).

Al no disponer el modelo de un módulo para la simulación del riego por surcos, y dada la escasa importancia del cultivo de hortalizas en la CRV, la simulación del riego de dichos cultivos se desarrolló con ADORsuperficie. Dicha simulación se realizó de tal manera que sus resultados se equipararan a los determinados en las evaluaciones de riego descritas en el Capítulo 3. De igual modo se procedió a la simulación del riego del arroz, de tal forma que al finalizar la campaña los resultados del balance de agua en las parcelas se aproximasen al observado en trabajos experimentales llevados a cabo en el valle del Ebro (Pérez, comunicación personal). El hecho de considerar en la simulación peticiones puntuales de agua para este cultivo, cuando en gran parte de su ciclo se realiza un riego continuo, no se aleja de la realidad en la CRV. Ello es debido a que los agricultores, al no poder contar con un suministro continuo de agua desde las redes de distribución, han construido pequeñas balsas particulares para poder llevar a cabo el cultivo del arroz.

La simulación del riego por superficie se llevó a cabo para un único evento de riego. Los resultados obtenidos para cada parcela se almacenaron en una librería para su uso en posteriores riegos a lo largo de la simulación de la campaña completa. De esta forma se optimizó el tiempo de simulación.

La aplicación del módulo de balance hidrosalino ADORhidrosalino no se llevó a cabo en la simulación de los flujos de agua de la CRV. La falta de datos específicos necesarios para la calibración del módulo y la simulación de dicho balance, como un mapa de salinidad de la zona, impidieron su uso en la comunidad. Asimismo, el uso de agua de diferentes fuentes (Canal de Bardenas y red de desagües) y con diferentes calidades, podría originar problemas en la simulación, tal como se indica en el Capítulo 4.

## 5.4 Calibración y validación del modelo

La calibración y posterior validación del modelo de simulación en su aplicación a la CRV se vio limitada por la calidad y cantidad de los datos disponibles para su realización. Como consecuencia de ello, el único parámetro utilizado para llevar a cabo estos procesos fue el volumen mensual de agua demandada por la comunidad. Otras variables que podrían haber permitido calibrar otros resultados proporcionados por el modelo (volúmenes de las aguas de retorno de riego, volúmenes de las aguas transferidas entre desagües y acequias, valores

de producción de los cultivos, etc) tienen registros muy limitados en el tiempo y en el espacio (Causapé et al., 2004), o de muy escasa fiabilidad, si los tienen.

La propia variable de demanda de agua escogida para la calibración presenta una sensible incertidumbre en sus valores. En efecto, dicha demanda es registrada para llevar a cabo las facturaciones volumétricas del agua de riego tanto por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) mediante sus aforadores situados en cada toma del Canal de Bardenas, como por la propia CRV, a través del cómputo de horas de riego de cada agricultor y del caudal registrado en los aforadores situados en diferentes puntos de su red de distribución. Las diferencias encontradas entre ambas fuentes de información para los datos agregados anualmente fueron del 2,6 % en 2000 y del 21,0 % en 2001 (porcentajes calculados sobre los volúmenes registrados por la CHE).

La calibración del modelo se llevó a cabo a partir de los datos de demanda disponibles en el Sector XIX de la CRV. La elección de este sector se debió a la no existencia de fuentes de agua no procedentes directamente del Canal de Bardenas, como transferencias entre desagües y acequias, o volúmenes de agua almacenados en balsas de regulación. Asimismo, las tomas de agua de otras comunidades en la acequia principal de la que se abastece son escasas, reduciendo así la incertidumbre generada por la medida de dicho reparto de agua.

Los parámetros sobre los que se actuó en la calibración del modelo fueron de carácter operacional. La razón fue que en la toma de decisiones durante el riego, o en la operación de la red de distribución, intervienen componentes no ligadas al balance hídrico (Lamacq, 1997, Labbé et al., 2000) que no se han modelizado en ADOR-simulación. Estos parámetros fueron el intervalo mínimo entre riegos, restringido por la propia comunidad, la limitación de los riegos a partir del mes de septiembre, como consecuencia de la escasa disponibilidad de agua regulada en el embalse de Yesa, y la toma de decisiones sobre el momento del riego y la duración del mismo, decidida por los propios agricultores.

El valor de estos parámetros operacionales se encuentra fuertemente influenciado por la actitud de los agricultores y los gestores de la comunidad frente a la disponibilidad de agua regulada en el embalse de Yesa, en la cabecera del sistema (componente no ligada al balance hídrico del modelo). Por ello, la calibración se efectuó tanto para el año 2000, considerado como un año húmedo, como para el año 2001, considerado como un año seco.

Así, en el año 2000 se consideró un intervalo mínimo entre riegos de 12 días para los cultivos de maíz y de hortalizas. Este intervalo es el que habitualmente se aplica por los gestores de la CRV al iniciarse el régimen rotacional de reparto de agua entre los agricultores. De esta manera el número de riegos que se aplican a estos cultivos varía entre 7 y 8 para el maíz y entre 9 y 12 para las hortalizas, según la base de datos de la CRV. Se comprobó cómo la simulación generaba resultados similares.

Esta restricción resulta en algunos casos redundante dado que la limitación de la capacidad de la red de distribución actuaría por sí misma como factor limitante. Sin embargo, en parcelas sobre suelos de plataformas residuales que se abastecen de tomas directas de acequias principales, o de acequias que sirven a una reducida superficie, el número de riegos simulados se situaría entre 20 y 25 si no existiera este tipo de limitaciones. Esta situación, aunque pudiera resultar factible, no se permite por parte de los gestores de la CRV dado que supondría un importante incremento de la demanda de agua de la comunidad (se alcanzarían demandas unitarias de agua superiores a los  $20.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  en estas parcelas), además de existir un agravio comparativo entre agricultores en función del lugar en el que se encuentran sus parcelas.

Otro grupo de cultivos en los que se introdujeron intervalos de tiempo mínimos entre riegos fueron todos aquellos a los que por circunstancias agronómicas o económicas únicamente se les proporcionan riegos de apoyo, o se les somete de forma deliberada a un importante estrés hídrico. Estos cultivos son la veza, el girasol y los cereales de invierno, cuyos intervalos entre riegos se ajustaron de tal forma que el número de riegos simulado se correspondiese con el número de riegos realmente producidos, según la base de datos de la comunidad.

Por último, hay que indicar que a los cultivos como la alfalfa o la hierba no se les impuso restricciones en este sentido. Esto fue así dado que el modelo ya incorpora implícitamente dicha limitación, al no permitirse el riego durante los cuatro días previos a su siega.

Para tener en cuenta las restricciones de agua que se producen en el mes de septiembre por la escasa disponibilidad de agua en el embalse de Yesa, se introdujo una limitación al riego con base fenológica. Así, se impidió satisfacer las demandas de agua para aquellos cultivos que a partir del 8 de septiembre hubiesen alcanzado la fase final de su ciclo fenológico. De esta manera se redujo

el número de riegos durante el mes de septiembre sin afectar sensiblemente a la producción de los cultivos.

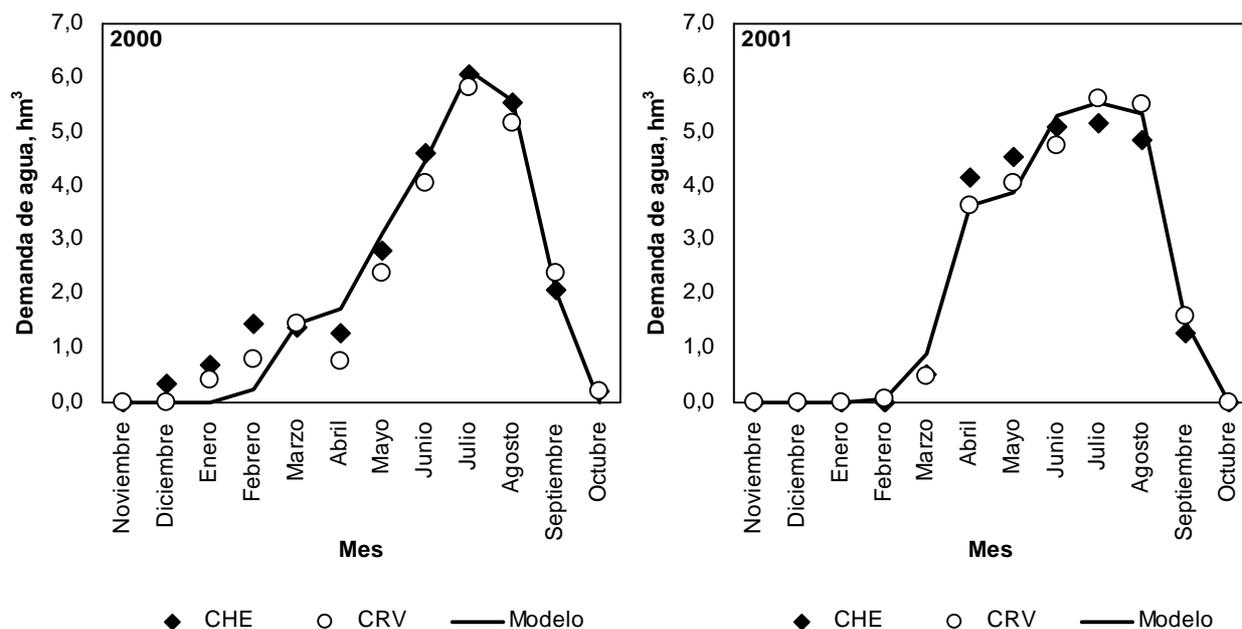
El tiempo de corte que se consideró en el riego de las parcelas durante el año 2000 se estimó por extrapolación a partir de los resultados de las evaluaciones de riego llevadas a cabo durante 1999 y 2000 (véase el Capítulo 3). Ambos años son considerados como años medios respecto a las necesidades hídricas de los cultivos.

Respecto a la calibración en el año 2001, los parámetros operacionales que variaron fueron el intervalo mínimo entre riegos de maíz y hortalizas, la limitación al riego en el mes de septiembre, así como el tiempo de corte. En los dos primeros casos las variaciones respecto al año 2000 fueron escasas, debido a que con los valores de dicho año el estrés hídrico inducido en los cultivos era ya importante. En efecto, la restricción en cuanto al intervalo mínimo entre riegos pasó de 12 a 13 días en maíz y hortalizas, mientras que la limitación de riego en el mes de septiembre pasó al día 7.

Por el contrario, la variación más importante se produjo en el tiempo de corte del riego de los cultivos. Dicho parámetro pasó a ser el 75 % del que se consideró en el año 2000, lo que implicó una importante reducción de la demanda de agua sin menoscabo apreciable de la producción.

La decisión de solicitud de riego, a pesar de constituir otro parámetro operacional, no se modificó respecto al planteamiento inicial en el que al menos el 25 % de puntos de cálculo en el módulo de cultivos superase el agotamiento permisible de agua en el suelo. La variación de este parámetro no alteró sensiblemente los resultados de la simulación (resultados no presentados). Ello fue así debido a que la elevada uniformidad de los riegos (según se expone en el Capítulo 3) no introducía variaciones importantes en cuanto al contenido de humedad de los diferentes puntos de cálculo. Por otra parte, la escasa *CRAD* de los suelos de plataformas residuales difuminó el efecto de la variabilidad de esta propiedad física del suelo dentro de cada parcela respecto a la solicitud de agua.

En la Figura 5.3 se muestran las curvas de demanda de agua mensual del Sector XIX para los años 2000 y 2001, tanto simuladas como determinadas a partir de los datos registrados por la CHE y la CRV.



**Figura 5.3** Evolución de las demandas de agua mensuales registradas (por la CHE y la CRV) y simuladas con ADOR-simulación en el Sector XIX de la CRV para los años 2000 y 2001

En ambos años se puede comprobar como la demanda simulada se ajusta a la forma de las curvas de demanda registradas por la CHE y la CRV. De forma acumulada, las diferencias encontradas son del 0,9 % en 2000 y del 1,9 % en 2001 (porcentajes calculados respecto al promedio de las demandas registradas por la CHE y la CRV). Por meses, durante el periodo de mayores necesidades hídricas (junio, julio y agosto), las diferencias no superan el 4,5 % en ambos años, salvo en el mes de junio de 2001, en el que alcanzaron un 7,6 %. El retraso que durante este mes se produjo en el paso al sistema de distribución rotacional de agua ante el incremento de la demanda durante dicho año pudo influir en los resultados.

Respecto a los meses de primavera, las diferencias son muy variables, alcanzando de media valores próximos al 30 %. Estas mayores diferencias son debidas fundamentalmente a las prácticas agronómicas de los agricultores, las cuales son difíciles de modelizar dada la gran variabilidad de las mismas. La influencia que en este sentido pueden tener la fecha de siembra o el agotamiento inicial de agua en el suelo se mostró escasa. En cualquier caso, la menor demanda de agua durante estos meses provoca que el error absoluto generado

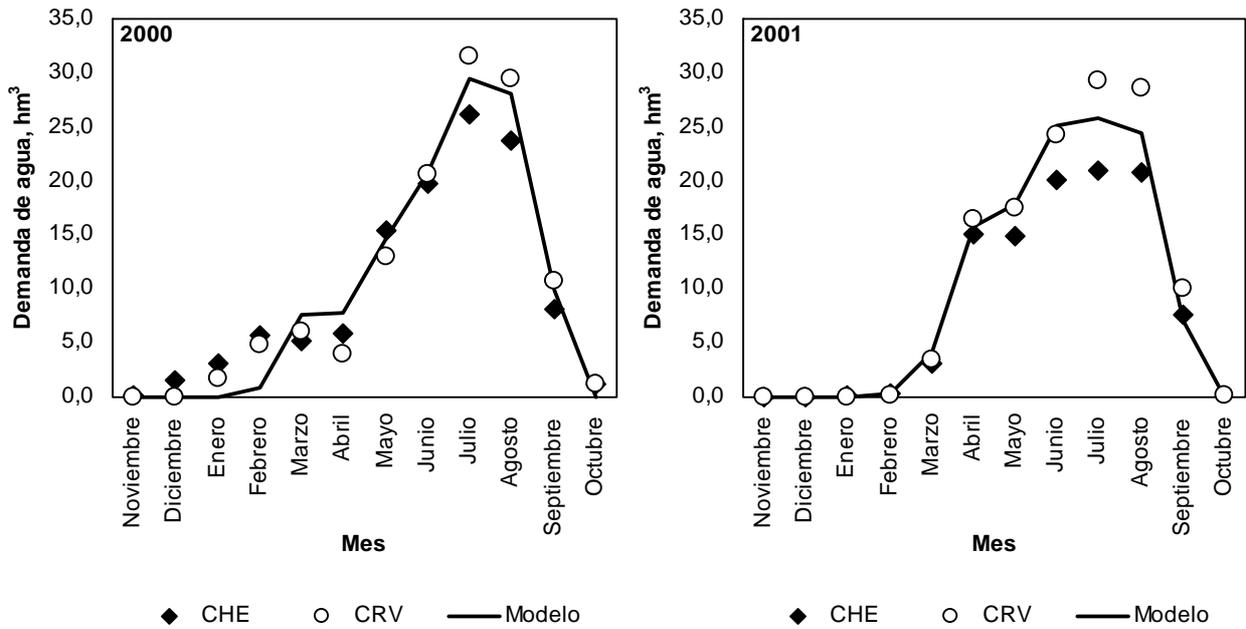
tenga una escasa importancia respecto al total anual, como lo demuestran las diferencias anuales antes indicadas.

El mes de septiembre presentó unas diferencias relativamente bajas, inferiores de media al 6,0 %. Este valor pone de manifiesto la necesidad de la calibración realizada para tener en cuenta las restricciones de agua que se producen al finalizar el mes, ya que de lo contrario la demanda de agua simulada hubiese sido mucho más elevada.

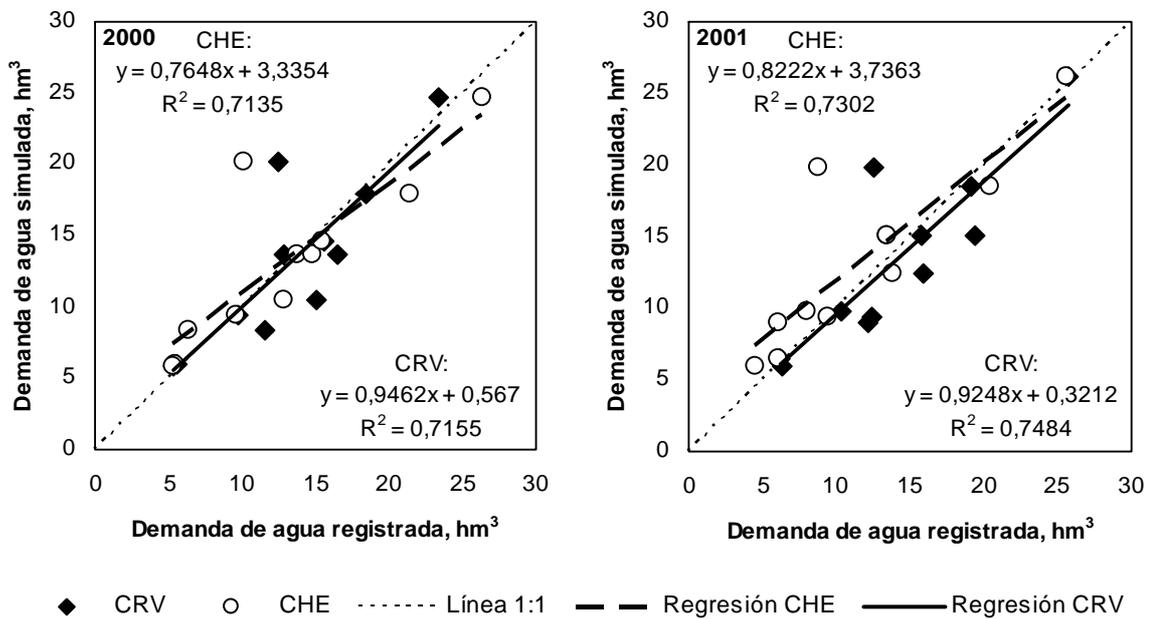
Para mostrar la fiabilidad de la calibración realizada para los años 2000 y 2001, se realizó una validación de la misma simulando la demanda de agua mensual para el conjunto de la comunidad, exceptuando el Sector XIX utilizado en la calibración.

En la Figura 5.4 se muestran las curvas de evolución mensual de la demanda simulada y registrada para los años 2000 y 2001 de forma análoga a la figura anterior. En las mismas se puede comprobar cómo los resultados son similares, produciéndose una diferencia anual entre la demanda simulada y el promedio de la demanda registrada por la CHE y la CRV del 0,3 % en 2000 y del 3,5 % en 2001. Por meses, la respuesta del modelo también refleja la evolución de la demanda registrada, produciéndose unas diferencias ligeramente superiores a las producidas en la calibración. Así, para los meses de junio a agosto, la diferencia máxima es del 5,4 %, salvo, de nuevo, el mes de junio de 2001, que alcanza el 13,1 %. En los primeros meses de la campaña la diferencia media se sitúa en el 23,0 %, mientras que en septiembre es del 12,5 %.

La Figura 5.5 muestra la relación entre el agua demandada simulada y la registrada por la CHE y la CRV para los distintos sectores de la comunidad (salvo el Sector XIX) durante los dos años de estudio. En ambos años se aprecia como las respectivas nubes de puntos se ajustan a la línea 1:1, como así lo confirman los análisis de regresión realizados al efecto. Para el año 2000 la pendiente y la ordenada en el origen de las funciones obtenidas, tanto para los registros de la CHE como de la CRV, no son significativamente diferentes de uno y de cero respectivamente ( $\alpha = 0,95$ ), al igual que ocurre en el año 2001.



**Figura 5.4** Evolución de las demandas de agua mensuales registradas (por la CHE y la CRV) y simuladas con ADOR-simulación en el conjunto de la CRV, excepto el Sector XIX, para los años 2000 y 2001



**Figura 5.5** Demandas de agua anuales registradas (por la CHE y la CRV) frente a las simuladas con ADOR-simulación para cada Sector de la CRV, excepto el Sector XIX, para los años 2000 y 2001

## 5.5 El uso del agua en la CRV durante los años 2000 y 2001

La simulación de la situación actual se ha realizado para los dos años de estudio considerando los factores de calibración antes descritos. Una síntesis de los resultados obtenidos para ambas simulaciones se muestra en la Tabla 5.2.

El análisis de estos resultados indica cómo la diferencia más significativa en cuanto a la gestión del agua entre los dos años ha sido la disminución del tiempo de riego. Referido a términos unitarios, dicho tiempo pasó de casi tres horas por hectárea a poco más de dos horas. Las repercusiones que en el funcionamiento de la CRV tuvo la variación de este parámetro han sido relevantes. A diferencia de otros modelos de similares características (Merkley, 1994, Yamashita y Walker, 1994, Prajamwong et al. 1997, Mateos et al., 2002), la capacidad de ADOR-simulación para simular el riego por superficie ha permitido cuantificar dicha influencia, así como la interacción entre las variables de riego en parcela con las de gestión de la red de distribución.

**Tabla 5.2** Resumen de los resultados obtenidos en la simulación con ADOR-simulación de la situación actual de la CRV durante los años 2000 y 2001, y de los diferentes escenarios de mejora

	Escenario Actual 2000	Escenario Actual 2001	Escenario 1 (24 h) 2000	Escenario 1 (16 h) 2000	Escenario 2 (16 h) 2000
Jornada de riego, h	24	24	24	16	16
Tiempo de riego unitario, h ha <sup>-1</sup>	2,88	2,16	2,16	2,16	2,16
Eficiencia de riego media, %	38,8	47,1	47,7	50,3	50,4
Reducción de rendimiento, %	25,3	24,3	19,7	24,8	24,9
Demanda unitaria de agua, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	11.528	11.495	10.040	8.522	8.504
Demanda de agua, hm <sup>3</sup>	143,3	146,8	125,8	106,6	91,9
Retornos de lluvia y riegos, hm <sup>3</sup>	115,7	109,9	90,5	80,8	65,8
Reutilización de agua de retornos, hm <sup>3</sup>	12,0	11,6	10,0	9,1	23,6
Evapotranspiración de cultivos, hm <sup>3</sup>	79,4	84,8	83,5	78,7	78,7

Dadas las características de los suelos de la comunidad, mayoritariamente con escasa CRAD, la disminución del tiempo de riego, y por tanto, de la dosis de agua aplicada, ha supuesto un incremento de la eficiencia de riego media en parcela ( $\overline{IE}$ ) (Burt et al., 1997), la cual pasó del 38,8 al 47,1 %. A su vez, este

incremento de la eficiencia motivó un descenso del volumen de los retornos de riego. No obstante, parte de la disminución del volumen de agua evacuado por la red de desagües se debió a las menores precipitaciones que se produjeron durante el año 2001.

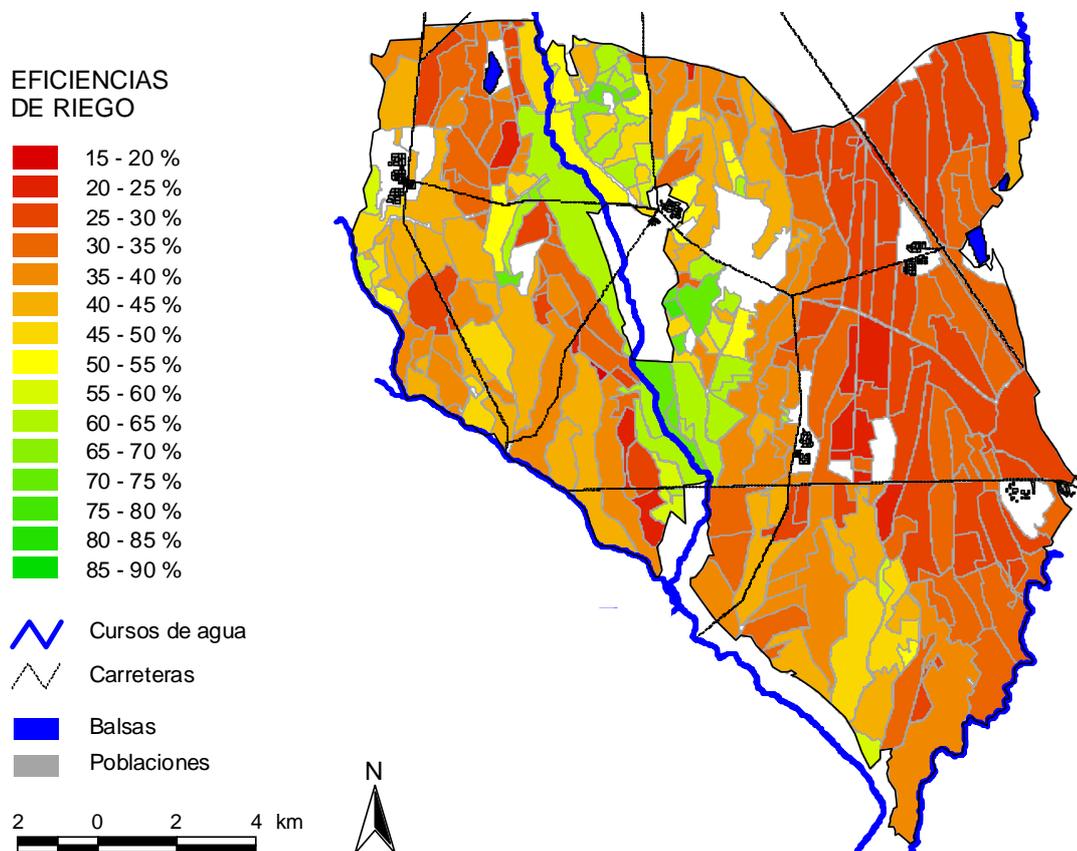
A pesar de la disminución de la dosis de agua aplicada en el riego, no se apreciaron cambios en la reducción media del rendimiento de los cultivos ( $\overline{YR}$ ). En efecto, dicha reducción alcanzó valores incluso ligeramente inferiores a los del año 2000, que se estimaron en un 25,3 % de media. Y ello a pesar de que la superficie cultivada se incrementó en más de 175 ha en 2001, de que la superficie dedicada a la producción de los cultivos de verano (de mayores necesidades hídricas) se incrementó en siete puntos porcentuales, y de que 2001 fuese considerado como un año seco.

En cualquier caso, la importante  $\overline{YR}$  que se produce por estrés hídrico en la CRV se debe a la escasa capacidad de transporte de la red de distribución, y a la baja CRAD de gran parte de sus suelos. Las restricciones de agua al final de la campaña, aunque también contribuyeron a esta pérdida de producción, no tuvieron tanta relevancia. Estos problemas de pérdida de rendimiento son frecuentes en el riego tradicional del valle del Ebro (Playán, et al., 2000), así como en otras zonas del mundo (Vidal et al., 2001, Unal et al., 2004).

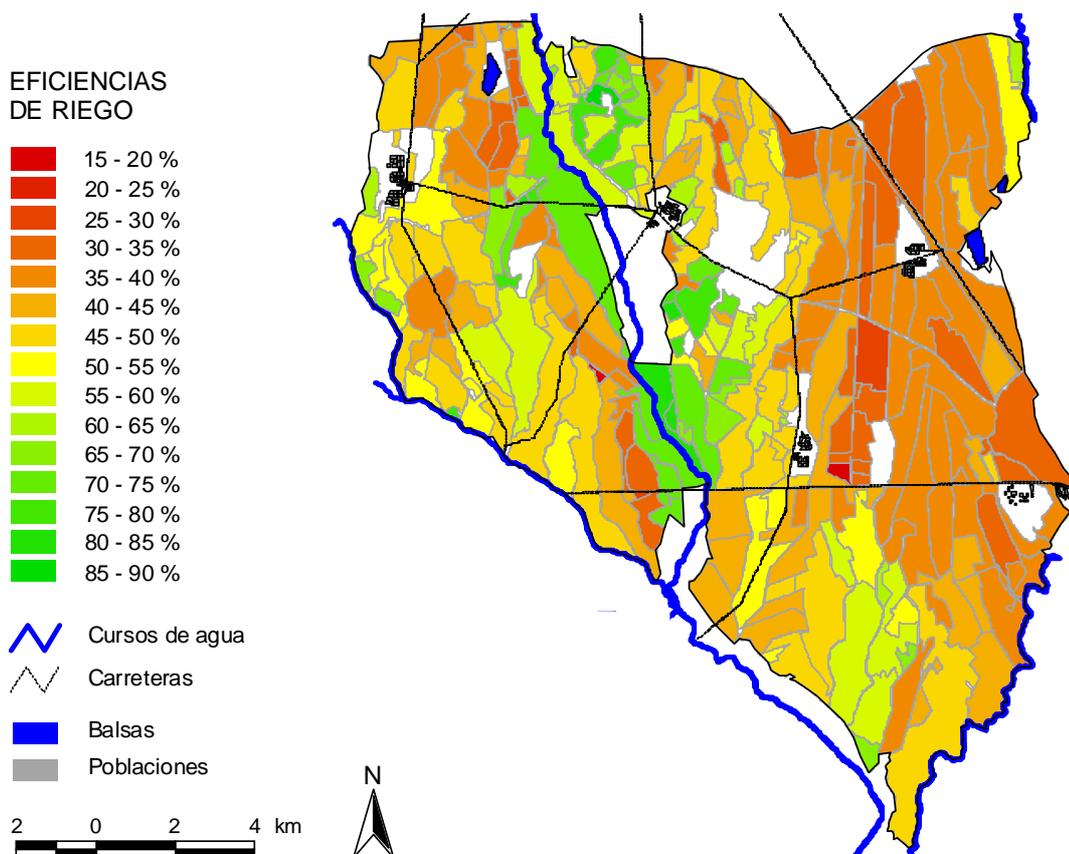
El incremento de la superficie de los cultivos con mayor demanda de agua fue el principal responsable de que el volumen total de la evapotranspiración de los cultivos se incrementase en más de cinco hectómetros cúbicos. Sin embargo, y gracias al aumento de la eficiencia de riego, la demanda de agua del conjunto de la comunidad se incrementó en poco más de tres hectómetros cúbicos.

La distribución espacial de dicha eficiencia de riego en los “turnos” de la CRV muestra la influencia del tipo de suelo sobre el valor de la misma en los dos años estudiados (Figuras 5.6 y 5.7). Así, en los “turnos” donde predominan los suelos de fondos aluviales del río Riguel las eficiencias de riego superan el 50 %. Por el contrario en los “turnos” en los que el único tipo de suelo es el de las plataformas residuales dicha eficiencia no alcanza el 40 % (Sectores XXVIII, XXX, XXXI y XXXII). Esta diferencia no se muestra de forma tan significativa en la Figura 3.7 del Capítulo 3, en la que se representaba la distribución espacial de la eficiencia de aplicación. A su vez se observa que dicha eficiencia de aplicación es superior a la eficiencia de riego. Ello es debido a que en la eficiencia de riego se introduce el efecto del cultivo a través de su evapotranspiración, así como la

influencia que sobre ésta tienen los sucesivos riegos que durante la campaña aplica el agricultor. En el cálculo de la eficiencia de aplicación se estima dicho efecto (o el de otros usos beneficiosos del agua de riego) mediante el uso de una dosis requerida (cuantificada antes de que se produzca el uso del agua aplicada). En el caso que nos ocupa, esta diferencia se ve acentuada por la incertidumbre generada por la variabilidad de la CRAD de los suelos de plataformas residuales en la estimación de la dosis requerida, estando ya incluida dicha variabilidad en la determinación de la eficiencia de riego mediante el módulo de cultivos.

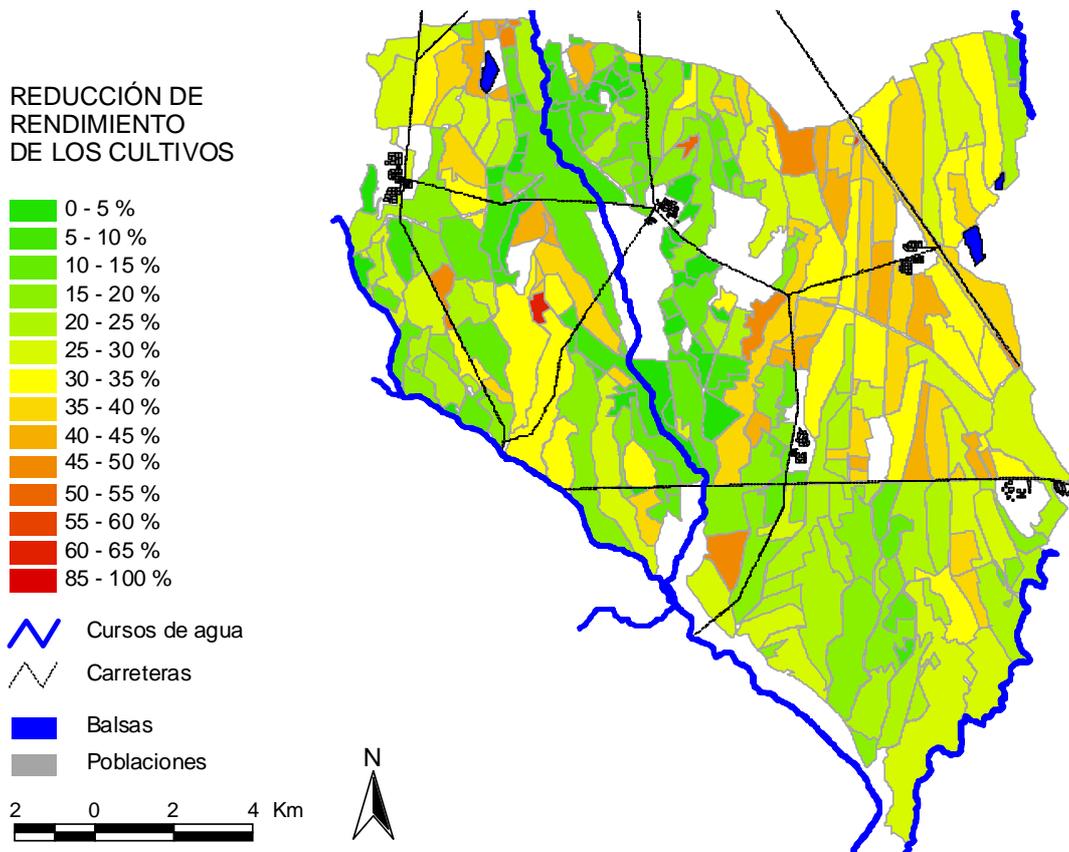


**Figura 5.6** Mapa de eficiencias de riego en la CRV para la situación actual en el año 2000



**Figura 5.7** Mapa de eficiencias de riego en la CRV para la situación actual en el año 2001

Las Figuras 5.8 y 5.9 muestran la distribución espacial de la reducción de rendimiento de los cultivos en los diferentes “turnos” de la comunidad para los años 2000 y 2001. Aunque también se aprecia la influencia del tipo de suelo en los resultados, la diferencia en cuanto a reducción de rendimiento se muestra más difusa que en el caso de la eficiencia de riego. Esto es debido a la existencia de cultivos como la veza o el girasol en los que las prácticas agronómicas que se dan en la zona inducen un elevado estrés hídrico independientemente del tipo de suelo sobre el que se cultiven. La escasa superficie ocupada por estos cultivos limita el efecto de esta última consideración.

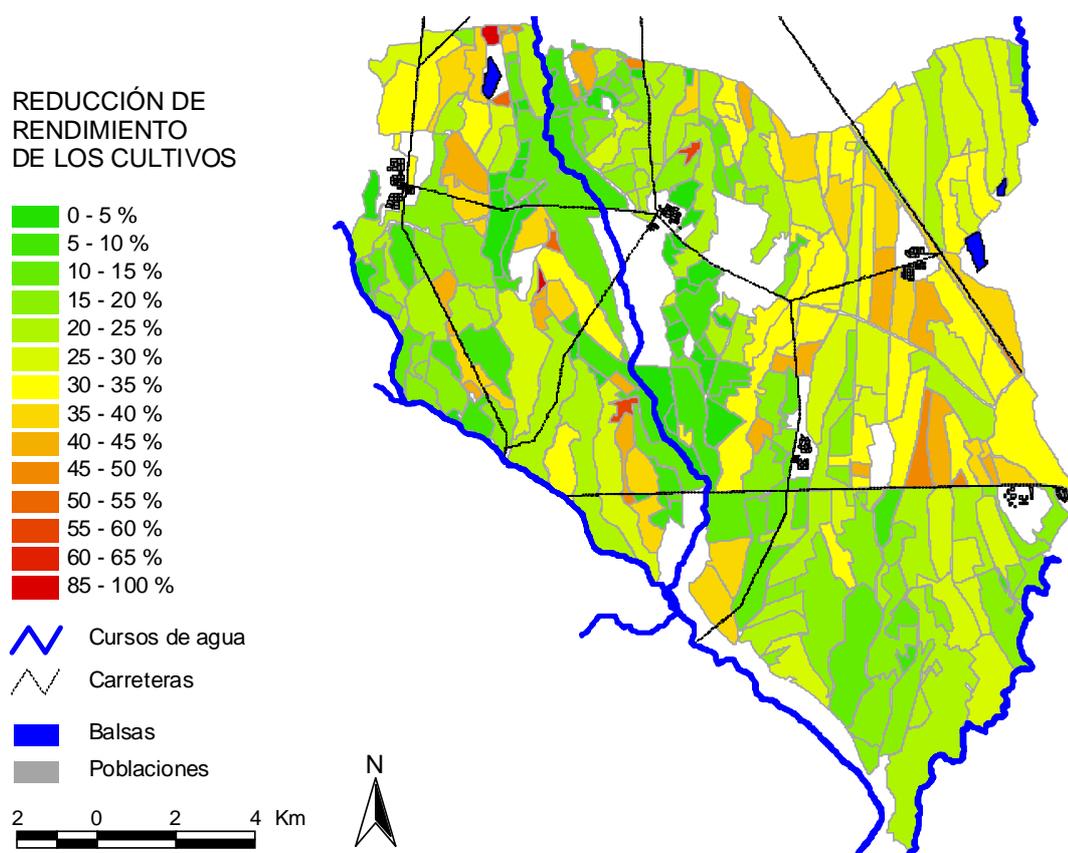


**Figura 5.8** Mapa de reducciones de rendimiento de los cultivos en la CRV para la situación actual en el año 2000

De todos estos resultados se deduce que los agricultores actuaron de forma más cuidadosa en el control del riego en respuesta a las condiciones meteorológicas y de disponibilidad de agua. Dado que este mayor control del riego no supuso una mayor disminución del rendimiento de los cultivos, se vuelve a evidenciar la posibilidad real de aumentar la eficiencia de riego mediante una mejora de la gestión del agua en la CRV. Así, en el año 2001 la reducción del tiempo de riego permitió mantener la capacidad productiva de los cultivos pese al aumento de la superficie cultivada de aquéllos con mayores necesidades hídricas.

Sin embargo, los cambios que en la gestión del agua indujeron las diferencias en las condiciones meteorológicas de los dos años estudiados no afectaron a los resultados de la simulación de la reutilización de las aguas de retorno. En efecto, el volumen de agua proveniente de las transferencias entre las redes de desagüe y de distribución apenas varió de una campaña a otra,

situándose en torno a los 12 hm<sup>3</sup>. Asimismo, las pérdidas operacionales de la red tampoco sufrieron cambios relativos de importancia, ya que, a pesar de que en 2001 se incrementaron estas pérdidas en un hectómetro cúbico, se siguieron manteniendo en torno al 2,5 % del agua demandada. Sin embargo, resulta razonable esperar que durante el año 2001, al igual que se mejoró la gestión del agua en el riego, se redujesen las pérdidas operacionales de red y se incrementase el reaprovechamiento de las aguas de retorno de riego.



**Figura 5.9** Mapa de reducciones de rendimiento de los cultivos en la CRV para la situación actual en el año 2001

La dificultad de modelizar la respuesta de estas variables a los cambios de gestión del agua por parte de agricultores y gestores de las comunidades hace imprescindible realizar una calibración específica de los mismos. Sin embargo, la falta de mediciones continuas de estos parámetros, como en el caso de la CRV, impide realizar dicha calibración, lo que dificulta reproducir con rigor su influencia

en la simulación de una comunidad de regantes. Por esta razón no se procedió al cálculo de la eficiencia de riego global para el conjunto de la CRV a partir del balance hídrico total de la misma.

En cualquier caso, el efecto que pudieron tener las pérdidas operacionales y de la propia red, dada su escasa magnitud, resulta difuminado entre la magnitud de la incertidumbre de los datos registrados de demanda y la precisión de los datos de entrada del modelo.

## 5.6 Escenarios de mejora del uso del agua en la CRV

Para valorar la capacidad del modelo para reproducir los efectos que sobre una comunidad de regantes pueden tener diferentes alternativas de modernización de sus regadíos se plantearon dos escenarios de mejora en la CRV. Los mismos se diseñaron considerando la preferencia de los agricultores de la comunidad por el riego por superficie. Se tuvieron en cuenta tanto la mejora de la gestión como la mejora de las infraestructuras de riego. Igualmente, se consideraron los resultados de los estudios llevados a cabo en el Capítulo 3 y en la simulación de la situación actual.

Dado que no se pretende abordar de forma exhaustiva la modernización de la CRV, sino verificar la capacidad de prospectiva de ADOR-simulación, los escenarios planteados se simularon sobre las condiciones de la CRV en el año 2000. Estos escenarios fueron los siguientes:

- **Escenario 1:** representa una situación de mejora de la gestión del agua mediante la reducción en un 25 % del tiempo de riego asignado al año 2000, según los resultados de las evaluaciones de riego. Tal y como se comprobó en el estudio de la situación actual para la campaña de 2001, esta reducción del tiempo de riego es factible de llevar a la práctica por parte de los agricultores. Reducciones más intensas que permitieran acercarse a la eficiencia de aplicación potencial (Burt et al., 1997) podrían encontrar dificultades para su puesta en práctica, como se expuso en el Capítulo 3, por lo que no se han considerado. Asimismo, y dado que esta reducción del tiempo de riego permitiría liberar capacidad de transporte en la red de

distribución, se analizaron las posibilidades de reducir la jornada de riego. En tal caso, sería necesario el almacenamiento del agua proveniente del Canal de Bardenas durante las horas sin riego.

- **Escenario 2:** contempla una situación que combina la mejora de la gestión del Escenario 1 con la mejora de las infraestructuras de riego. Dicha mejora consistió en incrementar la reutilización de los retornos de agua de riego y de lluvia que circulan por la red de desagüe de la comunidad. Para ello se planteó la construcción de las obras necesarias para la realización de la transferencia de aguas de retorno procedentes de los colectores principales C-12, C-13 y C-14, y del propio río Riguel (en la desembocadura del colector C-12), a las dos acequias secundarias que derivadas del extremo de la acequia principal A-4, abastecen los Sectores XXVII, XXIX y XXXII (Figura 5.2). En dichas obras se contempla tanto la propia conducción de agua como la construcción de las estaciones de bombeo necesarias en caso de situarse los puntos de toma a inferior cota que las acequias antes reseñadas. Asimismo, en el caso de considerar una reducción de la jornada de riego, tal como se ha indicado en el Escenario 1, se debería construir una o varias balsas de regulación para aprovechar de forma continua los caudales de transferencia.

En este último escenario no se ha contemplado el incremento de los caudales de riego dado que, tal y como se mostró en el Capítulo 3, la mejora que supondría en términos de eficiencia respecto a las actuaciones centradas en la gestión no justificaría el coste derivado de las inversiones necesarias. Asimismo, esta actuación, u otras de elevado coste, tampoco se justifica cuando los resultados de esta Tesis están mostrando la necesidad de llevar a cabo en un futuro amplias transformaciones a riego a presión para llevar la eficiencia a los estándares actuales.

Para llevar a cabo la simulación de los diferentes escenarios se consideraron los mismos factores de calibración de los parámetros operacionales descritos en la sección 5.4, salvo en el caso del intervalo mínimo entre riegos para maíz y hortalizas. Para estos cultivos dicho intervalo mínimo se redujo hasta nueve días. La razón de este cambio se debe a que con un menor tiempo de corte, se puede incrementar la frecuencia de riego a pesar de disponer de la misma capacidad de transporte en la red de distribución. El mantenimiento de esta

restricción (aunque suavizada) responde al hecho de que, a pesar de la reducción de dosis aplicada, ésta sigue siendo elevada al tratarse de riego por superficie, por lo que no se pueden aplicar riegos con elevada frecuencia tal como requerirían las parcelas situadas sobre suelos de escasa *CRAD*. La duración del intervalo mínimo entre riegos usado en este escenario se corresponde con el período de tiempo en el que se agotaría la *CRAD* de los suelos de plataformas residuales considerando las necesidades hídricas punta del maíz.

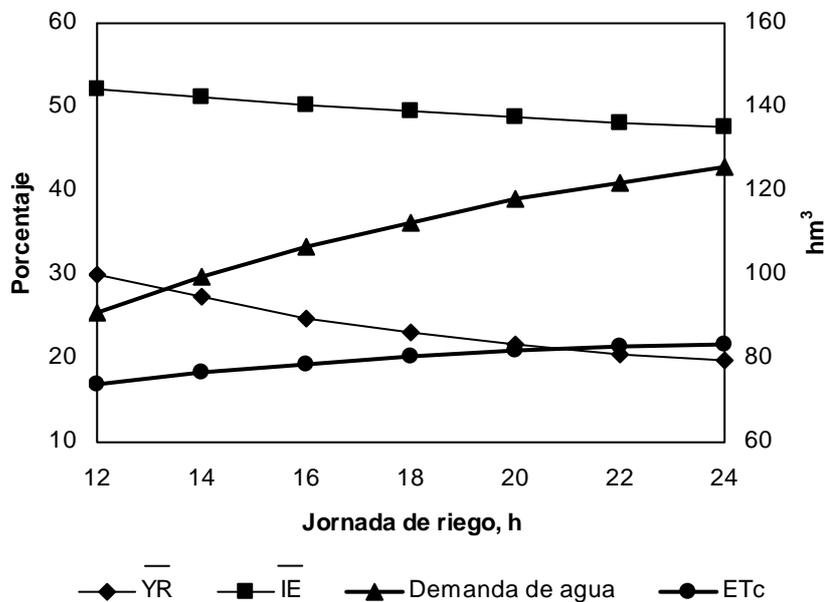
En la Tabla 5.2 se muestra un resumen de los resultados de diversas variables obtenidos en la simulación del Escenario 1 con una jornada de riego de 24 h. Como puede observarse, gracias a la reducción del tiempo de corte se ha obtenido una mejor respuesta productiva de los cultivos. La razón es que la reducción de la duración del riego conlleva la reducción del tiempo que se necesita para completar un riego en todas las parcelas comprendidas en un “turno”. De esta manera se puede incrementar el número de riegos a lo largo de la campaña, lo cual redundaría en un mejor suministro de agua a los cultivos, y por tanto en un menor estrés hídrico.

A pesar de este aumento del número de riegos, la reducción de la dosis aplicada en cada uno de ellos permite reducir la demanda de agua del conjunto de la comunidad en más de un 12,0 % respecto a la situación original del año 2000 (Tabla 5.2). Como a su vez se produce un incremento de la evapotranspiración de los cultivos en un 5,0 % como consecuencia de su mejor abastecimiento hídrico, la  $\overline{IE}$  se incrementa respecto a la situación original hasta alcanzar un 47,7 %. Este aumento de la eficiencia conllevaría a su vez la disminución del volumen de las aguas de retorno en un 21,7 %.

Ante esta situación se podría optar por reducir la jornada de riego, lo que tendría una gran aceptación por parte de los agricultores. Para poder llevar a cabo esta reducción sería preciso construir en la comunidad embalses de regulación que permitiesen almacenar el agua proveniente del Canal de Bardenas durante las horas de no riego. La capacidad conjunta de los mismos para una regulación de ocho horas se ha determinado en 315.000 m<sup>3</sup>, según los resultados de la simulación para el año 2000 (sería necesario realizar un estudio estadístico para calcular el volumen de diseño final). No obstante, habría que estudiar la posibilidad de que una vez puestos en servicio los tres embalses laterales del Canal de Bardenas, su capacidad y la del propio Canal fuesen suficientes para realizar esta función de regulación nocturna.

La reducción de la jornada daría lugar a una disminución de la producción como consecuencia de la reducción del número de riegos por descender el volumen de agua que transportaría la red de distribución. Así, se reduciría por tanto la demanda de agua del conjunto de la comunidad.

Todo ello explicaría la evolución de las curvas que de estas variables se muestran en la Figura 5.10 en función de la jornada de riego. Esta evolución se va produciendo de manera continua conforme va disminuyendo la jornada, hasta que a las 16 h se encuentra un punto de inflexión a partir del cual la demanda disminuye de manera más acusada. Debido a ello también se acentúa la reducción de la evapotranspiración de los cultivos, y por tanto, de su producción.



**Figura 5.10** Evolución de la demanda de agua, la  $\overline{IE}$  (%), la  $\overline{YR}$  (%), y la  $ET_c$  ( $hm^3$ ) en función de la jornada de riego para el Escenario 1

A partir de la Figura 5.10, y con un análisis económico que tuviese en cuenta el coste del agua, de la mano de obra para el riego, de los embalses de regulación interna y el valor de la producción, la comunidad debería adoptar la jornada que resultase más beneficiosa para los agricultores. Asimismo, esta decisión podría variarse en función de la disponibilidad de agua en el sistema al inicio de una campaña en particular. Finalmente, la reducción de la jornada de

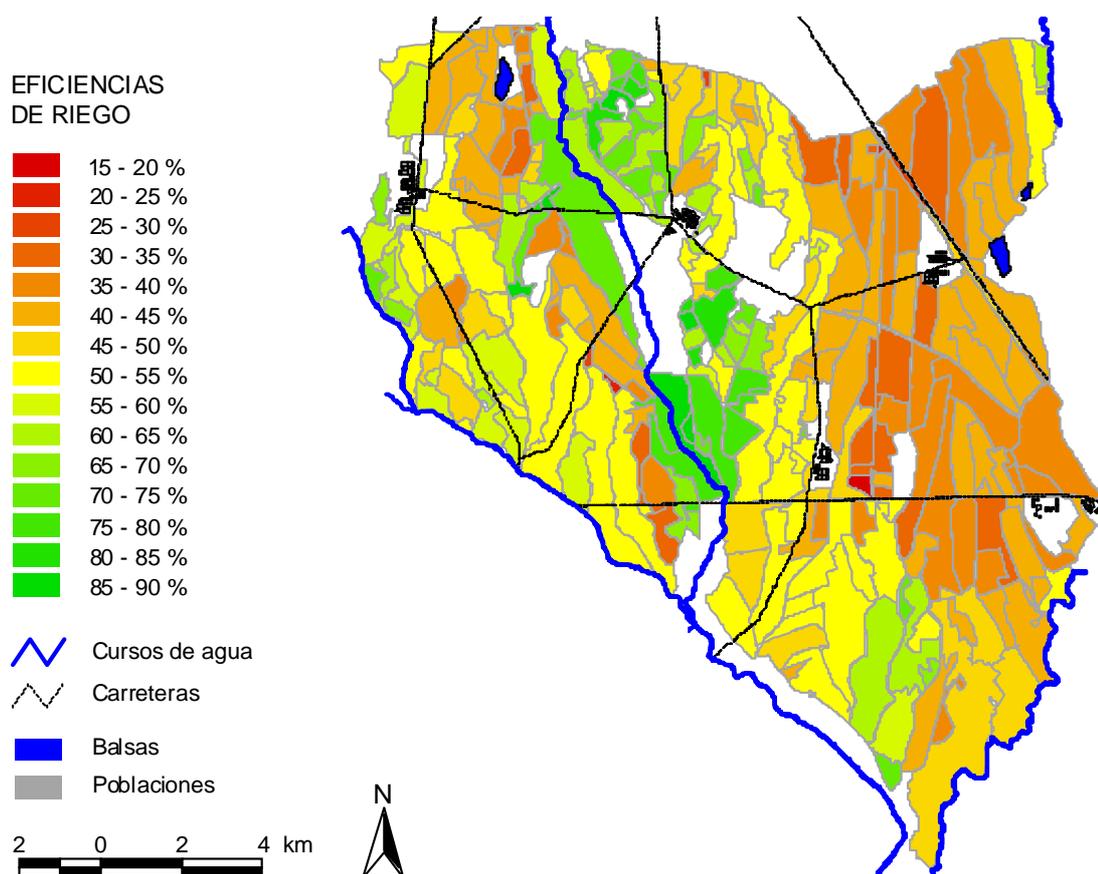
riego podría usarse únicamente en los meses de demanda media y baja, usando una jornada de 24 horas en las semanas del año de mayor demanda.

Para la simulación del Escenario 2, en el que se combina la mejora de las infraestructuras con la mejora de la gestión del escenario anterior, se ha escogido una jornada de riego de 16 h. De esta forma se optimiza la eficiencia de riego y la demanda de agua de la comunidad, manteniendo la misma producción de los cultivos que en la situación original (años 2000 y 2001).

Como consecuencia de la existencia de horas en las que no se producirá demanda de agua, y con el fin de aprovechar de forma continua los caudales provenientes de los colectores, sería necesaria la construcción de balsas de regulación en cada uno de los tres nuevos puntos de transferencia (sobre los colectores C-12 y río Riguel, C-13 y C-14). La capacidad conjunta de las balsas de los colectores se ha estimado en 40.000 m<sup>3</sup>, según los caudales medios obtenidos a partir de la simulación de la situación original en los puntos de toma de los colectores antes citados (como ya se ha indicado, sería necesario un estudio estadístico para determinar el volumen de diseño). La capacidad de cada balsa ligada a los puntos de transferencia, así como su localización, deberá determinarse de manera más precisa a escala de proyecto en función de la topografía, del tiempo de respuesta de los desagües a las aportaciones de agua por escorrentía y percolación, de las tarifas eléctricas en su caso, y de un análisis financiero que justifique económicamente su construcción y su capacidad. Asimismo, tal como ya se ha indicado en el Escenario 1, también sería necesaria la regulación del suministro de agua del Canal para adaptarla a la demanda de agua discontinua de la comunidad.

La simulación de este escenario ha mostrado cómo se ha conseguido incrementar el reaprovechamiento de las aguas de retorno de riego y lluvia en 11,5 hm<sup>3</sup> respecto a la situación original, alcanzando un total de 23,6 hm<sup>3</sup> (este volumen es equivalente al 44 % de la capacidad total de las tres balsas laterales del Canal de Bardenas mencionadas en la sección 5.1). Esto ha supuesto la reducción de la demanda hasta 91,8 hm<sup>3</sup>, lo que supone un 36,0 % respecto a la situación inicial y un 10,8 % respecto al Escenario 1 (jornada de 16 h). También se ha reducido el volumen de retornos de riego que salen de la comunidad (Tabla 5.2).

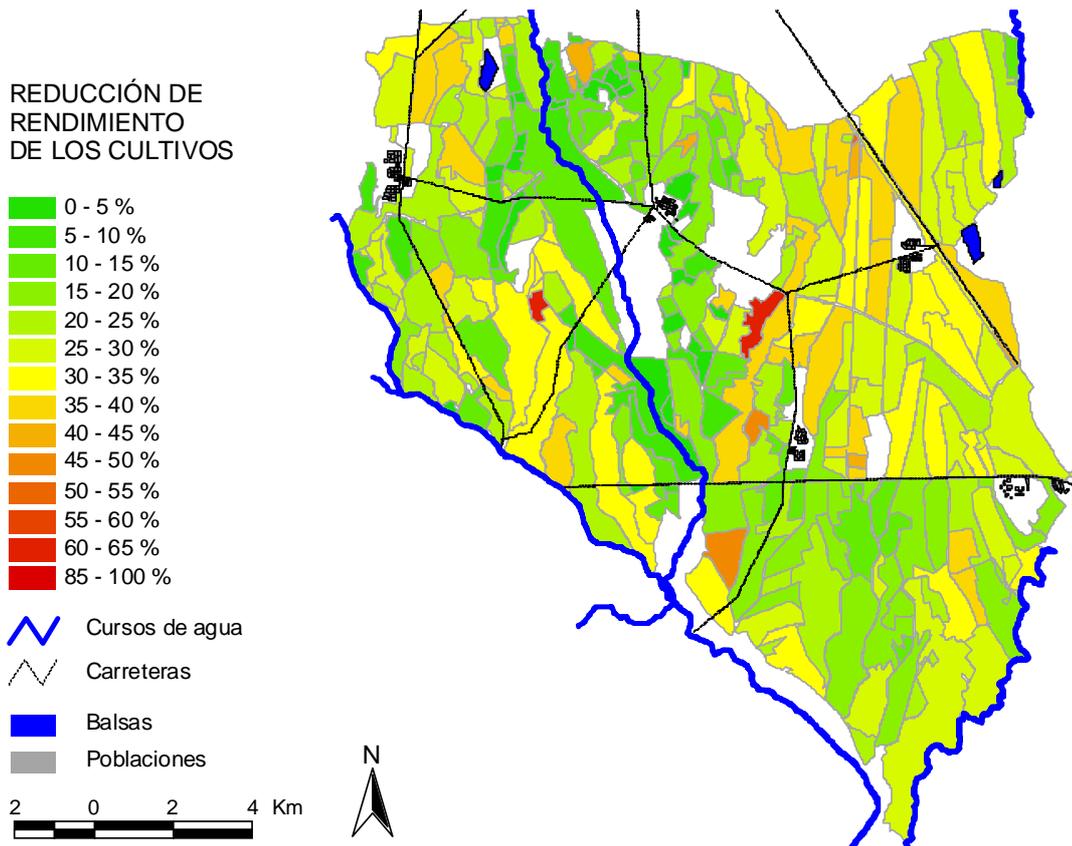
Tanto la  $\overline{IE}$  como la producción de los cultivos se mantendrían en los mismos niveles que en el Escenario 1, dado que no han variado las condiciones de riego en las parcelas (Tabla 5.2 y Figuras 5.11 y 5.12).



**Figura 5.11** Mapa de eficiencias de riego en la CRV para el Escenario 2 (16 h)

Con estos resultados se pone de manifiesto la necesidad de transmitir a los agricultores las ventajas de realizar un esfuerzo en el control del tiempo de riego. Aunque dicho control a veces resulta complicado por causas ajenas a la propia actividad del riego (como ya se describió en el Capítulo 3), durante el año 2001 se demostró la capacidad real del sistema de reducir de media en un 25 % la duración del riego. El efecto de esta mejora de la gestión del agua fue el incremento de la superficie dedicada a los cultivos más rentables, manteniendo su capacidad productiva en un año considerado como seco y en el que las

necesidades hídricas de los cultivos fueron mayores. Esta misma actuación realizada en un año con condiciones meteorológicas normales permitiría incrementar la producción agrícola, o bien, reducir la jornada de riego hasta en ocho horas.



**Figura 5.12** Mapa de reducciones de rendimiento de los cultivos en la CRV para el Escenario 2 (16 h)

Por otra parte, los resultados obtenidos mediante el modelo de simulación han evidenciado la capacidad que tiene la comunidad de seguir incrementando el reaprovechamiento de sus aguas de retorno. Esta actuación, que ya se viene realizando desde hace varios años, permite, con un bajo coste, reducir la demanda de agua proveniente del Canal de Bardenas, incrementando el aprovechamiento de la misma en beneficio de la propia comunidad.

La adopción del riego por aspersión o por goteo en la comunidad conllevaría la posibilidad de aplicar riegos de manera más frecuente con menores dosis de agua. De esta forma se mejoraría la disponibilidad de agua para los cultivos, redundando en la obtención de mejores producciones y eficiencias de riego. Ésta es una necesidad motivada por la escasa *CRAD* de los suelos de plataformas residuales, y que el modelo ha dejado patente a través del número de peticiones de riego realizadas por las parcelas situadas sobre estos suelos durante la simulación.

En este sentido, la integración en ADOR-simulación del modelo combinado de riego por aspersión y crecimiento de cultivos desarrollado y validado por Dechmi et al. (2004) dentro del proyecto de investigación ADOR (véase el Capítulo 4), permitirá reproducir los efectos de esta actuación y su comparación con la situación actual.

Uno de estos efectos, producto de la modernización del regadío de la comunidad, sería la modificación de su balance hidrológico. Así, la consecución de una mayor  $\overline{IE}$  generaría un ahorro de agua regulada como consecuencia del descenso de la demanda. Sin embargo, el mejor aprovisionamiento hídrico de los cultivos motivaría la reducción del estrés hídrico y el aumento de los usos consuntivos del agua por el incremento de su evapotranspiración, lo que supondría una menor disponibilidad de agua en la cuenca. Parece razonable pensar que mediante el riego por aspersión o por goteo la evapotranspiración de los cultivos se aproximaría a su nivel potencial. Asimismo, y gracias al incremento de la capacidad de la red de distribución de agua, la superficie de los cultivos de verano, más rentables, se vería incrementada dentro de la propia zona regable.

Para el año 2000, suponiendo que las superficies de abandono (522 ha) y de cultivos de invierno (1.760 ha) se dedicasen a la producción de cultivos de verano (en la misma proporción que la distribución de cultivos de este mismo año), la evapotranspiración de los cultivos alcanzaría los 100 hm<sup>3</sup>, 20 hm<sup>3</sup> más que la situación actual. Dicho volumen de agua dejaría de estar disponible en la cuenca, a pesar de que la demanda total de la comunidad disminuyese en 36 hm<sup>3</sup> (ahorro de agua regulada), hasta los 107 hm<sup>3</sup> (suponiendo una eficiencia global del 75 % y teniendo en cuenta una precipitación durante el cultivo de 26 hm<sup>3</sup> en el año 2000). Como consecuencia de este aumento de la eficiencia, los retornos de riego disminuirían sensiblemente, más aún si los nuevos sistemas de riego fueran por aspersión, dado que la proporción de pérdidas consuntivas sería mayor debido a las pérdidas por evaporación y arrastre. Asimismo, también disminuiría la

masa de nitratos y sales exportada por los desagües, aunque su concentración podría superar los límites establecidos por la Directiva Marco del Agua (2000/60 CE) (Cavero et al., 2003, Causapé et al., 2004). Por todo ello, para mantener los usos actuales (ambientales, agrícolas, urbanos, etc) que aprovechan las aguas de retorno que se vierten a los ríos, se deberían utilizar aguas provenientes directamente del embalse de Yesa. Este hecho supondría una mejora de la calidad del agua utilizada para estos usos.

Este efecto ya se ha mostrado en las simulaciones llevadas a cabo en este Capítulo. Así, en el Escenario 1, en el que se mantenía la jornada de riego en 24 h, se producía un descenso de la demanda de agua de la comunidad de 17 hm<sup>3</sup>, pero un aumento de la evapotranspiración de 4 hm<sup>3</sup>.

Estos resultados indican cómo la modernización de una zona regable puede suponer un ahorro de agua regulada, pero la disminución de la disponibilidad del recurso en la cuenca como consecuencia del aumento de los usos consuntivos del agua, tal como indican otros autores (Willardson et al., 1994, Playán et al., 1996, Playán et al., 1999). Estos efectos ponen de manifiesto la necesidad de llevar a cabo estudios detallados de las implicaciones hidrológicas que en una cuenca puede tener la modernización de los regadíos, así como las afecciones sobre el resto de usuarios del agua (Perry, 1999).

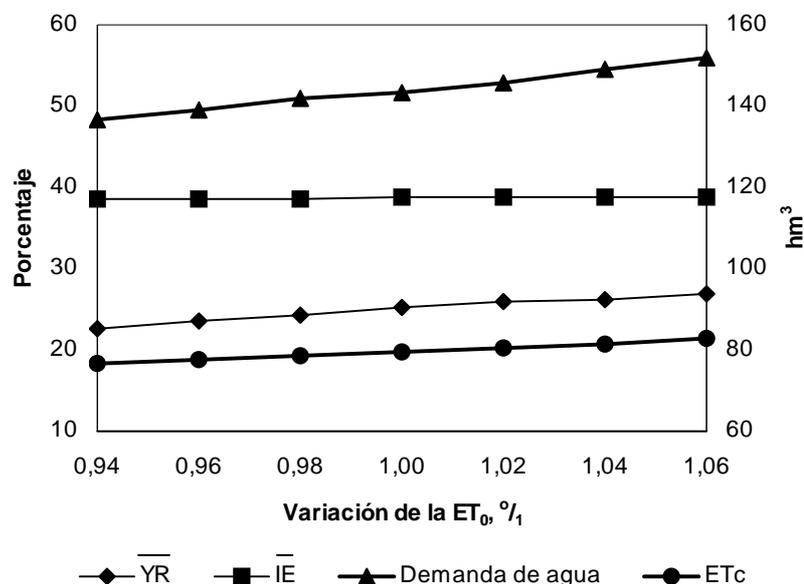
## 5.7 Influencia de la precisión de la estimación de la evapotranspiración de referencia en la simulación

En el Capítulo 2 se describió el trabajo llevado a cabo para evaluar la mejora que de la estimación de la  $ET_0$  se podría obtener introduciendo valores variables de la resistencia de la cubierta vegetal en la ecuación de Penman-Monteith (Allen et al., 1998). La importancia de la evapotranspiración de los cultivos en la planificación y gestión de regadíos hace necesario disponer de estimas precisas de la misma para optimizar el aprovechamiento de los recursos hídricos en la agricultura.

Aprovechando las capacidades de ADOR-simulación, se ha simulado el comportamiento del regadío de la CRV durante el año 2000 ante una variación entre el 94 y el 106 % de la estima original de la  $ET_0$ . De esta forma se ha pretendido cuantificar el efecto que la precisión de esta estima puede tener en la planificación y gestión del riego, y por tanto, sobre variables tales como la

demanda de agua de la comunidad de regantes, su eficiencia, o el rendimiento de los cultivos.

En la Figura 5.13 se muestra la evolución de dichas variables en función de la variación de la  $ET_0$ . Como puede observarse, la demanda de agua aumenta de forma proporcional al incremento de la  $ET_0$  desde su valor original. Esta variación llega a suponer en valores absolutos  $8,6 \text{ hm}^3$ , lo que equivale al 71,7 % de las aguas de retorno de riego reutilizadas en 2000, o el 95,5 % en el caso del Escenario 1. Sin embargo, la disminución de la  $ET_0$  supone un descenso de la demanda menor, siendo del 4,7 % con una  $ET_0$  equivalente al 94 % de la original. Esta menor respuesta al descenso de la  $ET_0$  se debe al estrés hídrico que la falta de capacidad de la red y la escasa  $CRAD$  de los suelos producen en los cultivos, y que en la situación original provoca un descenso de la  $\overline{YR}$  del 25,3 %. Así, con la reducción de la  $ET_0$ , el menor descenso de la demanda se traduce en una disminución de la  $\overline{YR}$  hasta el 22,7 % (un 10,1 % respecto a la situación original). Como consecuencia de este mejor abastecimiento hídrico de los cultivos, la simulación de la  $ET_c$  real (descontado el efecto del estrés hídrico), se reduce en menor medida respecto a la disminución de la  $ET_0$  que el aumento que supone el incremento de la  $ET_0$ , dado que la red no puede suministrar de forma completa la totalidad del incremento de las necesidades hídricas de los cultivos, por lo que la  $\overline{YR}$  aumenta hasta el 26,9 %.



**Figura 5.13** Evolución de la demanda de agua, la  $\overline{IE}$  (%), la  $\overline{YR}$  (%), y la  $ET_c$  ( $\text{hm}^3$ ) en función de la variación en la estimación de la  $ET_0$  respecto a la estimación original (1,00) para el año 2000 en la CRV

Estos resultados indican por tanto cómo pequeñas variaciones en la precisión de la estima de la  $ET_0$  pueden tener sensibles repercusiones económicas y medioambientales en una zona regable. Estas repercusiones se producen a través de la influencia que dicha variación tiene en la demanda de agua o en el rendimiento de los cultivos. Las mismas pueden llegar a equipararse a los resultados que se pueden obtener de determinadas actuaciones en la mejora de la gestión del agua, como la reutilización de las aguas de retorno de riego.

## 5.8 Conclusiones

La aplicación práctica de ADOR-simulación en la CRV, en su orientación a riego por superficie, ha mostrado su utilidad para la generación de información que permita apoyar la toma de decisiones en la planificación y gestión de su regadío.

La incorporación en ADOR-simulación de un módulo de simulación de riego por superficie ha permitido analizar la influencia que el manejo del riego en parcela tiene sobre el funcionamiento de una comunidad de regantes. De esta forma se mejoran las capacidades de prospectiva del modelo, al poder reproducir la interacción existente entre las variables del riego en parcela y las de la gestión de la distribución de agua.

La obtención de la eficiencia de riego mediante el modelo permite conseguir unos resultados más próximos a la realidad que los obtenidos a partir de la eficiencia de aplicación. Esto es así al no poder considerarse en su cálculo la influencia de los cultivos y de la sucesión de riegos a lo largo de la campaña.

La simulación a lo largo de una campaña de riego de los flujos de agua de una comunidad de regantes como la CRV permite estimar de manera más fiable su eficiencia de riego y sus balances hidrológicos. De esta forma se puede comprender mejor la situación actual de un regadío, así como determinar de manera más real los efectos de la modificación de sus infraestructuras o de su gestión.

La multitud de factores que influyen en la toma de decisiones de riego o de distribución del agua de los regantes y de los gestores de la comunidad hace muy complicada su completa modelización. Un conocimiento previo de los mismos

en función de las costumbres de la zona o de la disponibilidad de agua al inicio de la campaña ha resultado necesario para poder realizar la calibración local del modelo.

La falta de datos en la CRV ha obligado a que la calibración del modelo se haya llevado a cabo únicamente a partir de la demanda mensual de agua de la comunidad. Resultaría necesario disponer de otras variables (volumen de retornos de riego, volumen de aguas reutilizadas, etc) para conseguir una mayor certidumbre en la respuesta del modelo respecto a las mismas.

La falta de información homogénea sobre el funcionamiento, las infraestructuras o el parcelario de la CRV ha constituido un factor limitante para la aplicación del modelo. El uso de ADOR-gestión por parte de las comunidades de regantes permitirá sistematizar dicha información, de manera que sea fácilmente accesible por parte de ADOR-simulación. Asimismo, también ayudaría en el conocimiento de las costumbres en la gestión del agua en las comunidades. No obstante, se seguirán requiriendo trabajos de campo para completar los datos de entrada que necesita el modelo, como los referentes a las propiedades físicas de los suelos.

Las capacidades mostradas por el modelo en su aplicación práctica en la CRV le convierten en una herramienta que puede resultar de alto interés tanto para usos técnicos como científicos. Así, los procesos de modernización de regadíos, la mejora de la gestión de las comunidades de regantes, el apoyo a la planificación agronómica en campañas con escasez de agua, o el uso por parte de la Administración para determinar los niveles exigibles de excelencia en la gestión del agua en la agricultura, pueden ser algunas de sus aplicaciones técnicas. En cuanto las científicas, determinar la influencia que pueden tener los condicionantes naturales y humanos de una zona regable sobre el medio ambiente o el rendimiento de los cultivos son algunos ejemplos. La incorporación de los módulos referentes al riego por aspersión completará el ámbito de aplicación del modelo.

Los escenarios de mejora analizados permiten pensar que en la práctica sea difícil superar una eficiencia de riego en torno al 50 % mediante riego por superficie. Para alcanzar esta eficiencia en la situación actual, la mejora de la gestión del agua así como el incremento de la reutilización de los retornos de riego se han mostrado como actuaciones eficaces. De esta forma se conseguiría reducir

la demanda de agua, los retornos de riego y la jornada de riego, con los consiguientes beneficios ambientales y sociales.

En su aplicación en la CRV, ADOR-simulación ha mostrado como la escasa CRAD de la mayor parte de sus suelos requiere su transformación a riego a presión si se pretende incrementar la eficiencia de riego. Esta actuación puede suponer un drástico cambio en el balance hidrológico de la comunidad, generando una disminución de la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca que requeriría de estudios detallados para cuantificar sus efectos.

Asimismo, también se ha comprobado como la variación en la precisión de la estima de la  $ET_0$  de hasta un  $\pm 6$  % puede tener una sensible influencia en los resultados del balance hidrológico y de la producción agraria de la comunidad de regantes.

## 5.9 Referencias

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper nº 56. FAO. Roma (Italia). 300 pp.

Basso, L. 1994. Los retornos salinos del polígono de riego de Bardenas I y su contribución a la salinización de los ríos Arba y Riguel. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza. Zaragoza (España). 224 pp.

Burt, C.M., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., Solomon, K.H., Bliesner, R., Hardy L.A., Howell, T.A., Eisenhauer, D.E. 1997. Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. J. Irrig. Drain. Engrg., ASCE, 123(6), 423-442.

Causapé, J., Quílez, D., Aragüés, R. 2004. Assessment of irrigation and environmental quality at the hydrological basin level. II: salt and nitrate loads in irrigation return flows. Agric. Wat. Manage. (en prensa).

Cavero, J., Farré, I., Debaeke, P., Faci, J.M. 2000. Simulation of maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT models. Agron. J. 92(4), 679-690.

Cavero, J., Beltrán, A., Aragüés, R. 2003. Nitrate exported in the drainage water of two sprinkler irrigated watersheds. J. Environ. Qual. 32, 916-926.

Clemmens, A.J. 1987. Delivery system schedules and required capacities. En: Planning, operation, rehabilitation and automation of irrigation water delivery systems. Portland (EE.UU.). pp. 18-34.

Dechmi, F., Playán, E., Cavero, J., Martínez-Cob, A., Faci, J.M. 2004. A coupled crop and solid set sprinkler simulation model: I. Model development. J. Irrig. Drain. Engrg., ASCE (en prensa).

Doorenbos, J., Kassam, A.H. 1979. Yield response to water. FAO Irrig. and Drain. Paper nº 33. FAO. Roma (Italia). 212 pp.

Isidoro, D., Quílez, D., Aragüés, R. 2004. Water balance and irrigation performance análisis: La Violada irrigation district (Spain) as a case study. Agric. Wat. Manage., 64, 123-142.

Labbé, F., Ruelle, P., Garin, P., Leroy, P. 2000. Modelling irrigation scheduling to analyse water management at farm level, during water shortages. Europ. J. Agronomy 12, 55-67.

Lamacq, S. 1997. Coordination entre l'offre et la demande en eau sur un perimetre irrigue. Des scenarios, des systemes, et des hommes...Tesis doctoral. CEMAGREF. Montpellier (Francia). 111 pp.

Loomis, R.S., Connor, D.J. 1992. Crop Ecology. Productivity and Management in Agricultural Systems. Cambridge University Press. Cambridge (Reino Unido). 552 pp.

Maroto, J.V. 1990. Elementos de horticultura general. Ediciones Mundi-prensa. Madrid (España) 343 pp.

Martínez-Cob, A., Faci, J.M., Bercero, A. 1998. Evapotranspiración y necesidades de riego de los principales cultivos en las comarcas de Aragón. Institución "Fernando el Católico". Zaragoza (España). 223 pp.

Mateos, L., López-Cortijo, I., Sagardoy, J.A. 2002. SIMIS: the FAO decision support system for irrigation scheme management. Agric. Wat. Manage., 56, 193-206.

Merkley, G.P. 1994. Planning Distribution Model. A simulation tool for water management planning in large-scale irrigation and drainage networks. User's Guide. Biological and Irrigation Engineering Department, Utah State University. Logan (EE.UU.). 104 pp.

Playán, E., Faci, J.M., Serreta, A. 1996. Characterizing microtopographical effects on level-basin irrigation performance. Agric. Wat. Manage., 29, 129-145.

Playán E., Faci J.M., Cavero J., Dechmi F., Lecina S. 1999. Casos de estudio: ahorro de agua en los regadíos de Aragón. En: 5ª Conferencia Internacional del Seminario Permanente “Ciencia y Tecnología del Agua”: Nuevas Fuentes de Suministro de Agua, Iberdrola (Ed.), 24-25 de noviembre, en Valencia (España).

Playán, E., Slatni, A., Castillo, R., Faci, J.M. 2000. A case study for irrigation modernisation: II. Scenario Analysis. *Agric. Wat. Manage.*, 42, 335-354.

Perry, C.J. 1999. The IWMI water resources paradigm – definitions and implications. *Agric. Water Manage.* 40, 45-50.

Prajamwong, S., Merkley, G.P., Allen, R.G. 1997. Decision support model for irrigation water management. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, 123(2), 106-113.

Unal, H.B., Asik, S., Avci, M., Yasar, S., Akkuzu, E. 2004. Performance of water delivery system at tertiary canal level: a case study of the Menemen Left Ban Irrigation System, Gediz Basin, Turkey. *Agric. Wat. Manag.*, 65, 155-171.

Vidal, A., Comeau, A., Plusquellec, H., Gabelle, F. 2001. Case studies on water conservation in the mediterranean region. FAO. Roma (Italia). 52 pp.

Willardson, L.S., Allen, R.G., Frederiksen, H.D. 1994. Elimination of irrigation efficiencies. En: 13th Tech. Conf. USCID, USCID (Ed.), 19-22 Octubre, en Denver (EE.UU.). 17 pp.

Yamashita, S., Walker, W.R. 1994. Command area water demands. Part I. Validation and calibration of UCA model. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, 120(6), 1025-1042.



## **CONCLUSIONES GENERALES**

**6**

◀ **Salida de agua de escorrentía** en un tablar del Sector XXIX de la Comunidad de Regantes V

## 6.1 Conclusiones generales

### Al Capítulo 2

1. Las estimas diarias de la  $ET_0$  pueden ser obtenidas con suficiente precisión bajo condiciones semiáridas a partir de la ecuación de Penman-Monteith, usando promedios diarios de las variables meteorológicas, y asumiendo un valor fijo de  $r_c$  de  $70 \text{ s m}^{-1}$ .
2. En la estimación horaria de la  $ET_0$  debería considerarse el uso del modelo de Todorovic para obtener valores variables de  $r_c$  cuando además de condiciones semiáridas concurren situaciones ventosas.

### Al Capítulo 3

3. La escasa CRAD de los suelos predominantes de la CRV y el manejo del riego determinan que la eficiencia de aplicación de agua en parcela sea baja (inferior al 50 % de promedio), y muy similar a la eficiencia global de la comunidad, estimada a través del índice de aprovechamiento.
4. La escasa capacidad de la red de distribución provoca que los intervalos entre riegos puedan alcanzar los 12-14 días. Asimismo, la tendencia de los agricultores a prolongar el tiempo de riego, además de no proporcionar un mejor suministro de agua a sus cultivos, alarga dicho intervalo. Todo ello unido a la escasa CRAD de la mayor parte de los suelos de la CRV,

redunda en una menor producción de los cultivos como consecuencia del estrés hídrico inducido.

5. Cuando el sistema opera en situaciones de cierta escasez de agua, se consigue alcanzar una eficiencia global razonable (próxima al 65 %), gracias a un mayor control del riego y a un aprovechamiento más exhaustivo de las transferencias de agua entre desagües y acequias. Este hecho pone de manifiesto la necesidad de transmitir a los agricultores la necesidad de racionalizar el uso del agua.
6. Un incremento del caudal de riego no supondría una repercusión sensiblemente mayor en la eficiencia de aplicación que la conseguida mediante la reducción del tiempo de riego. Dicho incremento implicaría además una fuerte inversión económica en la mejora de las infraestructuras de distribución de agua.
7. A pesar de la capacidad del sistema para alcanzar mayores eficiencias de aplicación mediante una mejora de la gestión, la escasa *CRAD* de sus suelos recomienda su transformación a riego a presión.
8. La aplicación de modelos de simulación de riego por superficie ha permitido extender los resultados de las evaluaciones de riego en parcela a toda la comunidad de regantes.

#### **A los Capítulos 4 y 5**

9. El modelo ADOR-simulación, en su orientación al riego por superficie, permite simular los flujos de agua que se producen en una comunidad de regantes, proporcionando la capacidad de generar información que permita apoyar la toma de decisiones en la planificación y gestión del regadío.
10. La incorporación en ADOR-simulación de un módulo para la simulación del riego por superficie permite estimar la eficiencia de riego y los balances de agua en una comunidad de regantes a lo largo de una campaña de riego. Asimismo, permite analizar la influencia que el manejo del riego en parcela tiene sobre el funcionamiento de una comunidad de regantes.

11. Los resultados proporcionados por ADOR-simulación son más próximos a la realidad que los obtenidos por extrapolación de la eficiencia de aplicación, obtenida en una campaña de evaluaciones de riego, mediante un modelo que únicamente reproduce el riego por superficie.
12. La calibración y validación del modelo respecto a la demanda de agua proporcionó resultados satisfactorios dentro de la incertidumbre de los datos disponibles y de la precisión pretendida para el modelo. No obstante, se requeriría disponer de datos de otras variables para poder llevar a cabo una calibración y validación del funcionamiento del modelo respecto a las mismas.
13. La modelización del comportamiento de los agricultores y los gestores de una comunidad de regantes respecto al riego por superficie en parcela y la distribución de agua en lámina libre presenta importantes dificultades. Es necesario tener un conocimiento previo de dicho comportamiento frente a los condicionantes que influyen en el mismo a la hora de proceder a la calibración del modelo.
14. El uso de ADOR-gestión en las comunidades de regantes facilitará la aplicación de ADOR-simulación, al resolver la habitual carencia de datos que actualmente existe en las comunidades sobre sí mismas. No obstante, seguirá siendo necesario realizar estudios de campo para determinar ciertos parámetros, como las características físicas de los suelos o las pautas de comportamiento de regantes y gestores citadas en el punto anterior.
15. Las capacidades de simulación del modelo le convierten en una herramienta que puede resultar de alto interés tanto para usos técnicos (modernización de regadíos, mejora de la gestión del agua de riego, planificaciones agronómicas, auditorías ambientales, etc) como científicos (evaluación del impacto de las investigaciones en materia de regadíos en el funcionamiento de las comunidades de regantes).
16. La aplicación de ADOR-simulación en la CRV ha cuantificado de forma más precisa la situación actual de la comunidad y sus posibilidades de mejora. Así, los escenarios analizados permiten pensar que en la práctica sea difícil superar una eficiencia de riego en torno al 50 % si no se produce una transformación a riego a presión. Mientras tanto, la mejora

de la gestión del agua, así como una mayor reutilización de las aguas de retorno permitirían un mejor funcionamiento del regadío.

17. La modernización de una zona regable mediante su transformación desde riego por superficie a riego a presión implica un incremento de los usos consuntivos del agua, cuya magnitud depende de la calidad del riego de la situación actual. Como consecuencia de ello se producirá una disminución de la disponibilidad de agua en la cuenca, y la necesidad de buscar fuentes de agua alternativas a los usos que actualmente se aprovechan de las aguas de retorno de las zonas a modernizar.
18. La precisión de la estimación de la  $ET_0$  puede suponer sensibles cambios en los resultados del balance hidrológico y de la producción agraria obtenidos con ADOR-simulación.
19. La aplicación de la familia de programas informáticos ADOR puede contribuir de manera práctica a que las comunidades de regantes realicen una gestión activa del agua. Dicha gestión les permitiría anticiparse a la aparición de problemas y mejorar su funcionamiento de manera continua. De esta forma se optimizaría el aprovechamiento del agua y se minimizaría el impacto ambiental del regadío.



## **RECOMENDACIONES PARA LA INVESTIGACIÓN FUTURA**

**7**

◀ **Salida de la Acequia del Saso** desde el Canal de Bardenas con un sistema de telecontrol instalado por la CHE

## 7.1 Recomendaciones para la investigación futura

Mediante los trabajos llevados a cabo en esta Tesis se ha desarrollado el modelo ADOR-simulación. En el mismo se han establecido las relaciones que permiten la aplicación simultánea de varios módulos de simulación de diferente índole con el fin de reproducir los flujos de agua en una comunidad de regantes. Dichas relaciones constituyen la base sobre la que poder incorporar nuevos módulos y utilidades en un futuro.

La combinación de ADOR-simulación con el módulo de riego por aspersión ya desarrollado en el ámbito del mismo proyecto de investigación, así como con un módulo de simulación de redes de distribución de agua a presión, constituyen los objetivos inmediatos de nuevos desarrollos.

Otros trabajos podrían plantear la posibilidad de ampliación de los sistemas de organización de la distribución de agua, la simulación del riego por surcos, la realización de estimaciones económicas, la generalización de los resultados del balance hidrosalino, o la incorporación de un módulo de simulación de cultivos más avanzado que permita estimar pérdidas de nitratos o el efecto de la salinidad sobre la producción. Asimismo, la vinculación automática de los resultados del modelo a un SIG, así como el desarrollo de una interfaz gráfica, también constituyen un objetivo para próximos desarrollos del programa.

En cualquier caso, la incorporación de nuevos módulos y utilidades debe tener presente el esfuerzo necesario para conseguir los datos precisos para su funcionamiento, de manera que el modelo no pierda utilidad práctica.

El desarrollo de un sistema de comunicación para el intercambio de datos automático entre ADOR-gestión y ADOR-simulación facilitaría en gran medida su aplicación en las comunidades de regantes.

Asimismo, nuevos desarrollos podrían encaminarse a la conexión de estas dos aplicaciones informáticas con sistemas de telecontrol de zonas regables. Mediante dicha conexión, y con la disponibilidad de datos en tiempo real procedentes de estaciones agrometeorológicas automáticas, se podrían realizar programaciones de riego en tiempo real en grandes zonas regables. Dichas programaciones se plantearían con el objetivo de optimizar la productividad del agua de riego en función de las condiciones naturales de la zona, del funcionamiento de la red de distribución, y de las características de los sistemas de riego en parcela.

La consecución de una operación más precisa de los sistemas de distribución y aplicación de agua gracias a las nuevas tecnologías de telecontrol, justifica asimismo la continuación de las investigaciones en cuestiones relacionadas con la evapotranspiración. En efecto, la minimización de pérdidas operacionales incrementa la importancia que las pequeñas variaciones en la estima de la  $ET_c$  pueden suponer en la programación de riegos de una gran zona regable. La mejora de la estimación de la evapotranspiración de cultivos de alta rentabilidad económica, en combinación con el estudio de los efectos del estrés hídrico sobre su rendimiento, podrían constituir nuevos objetivos de trabajo. Los resultados de estos estudios permitirían que la combinación de modelos y sistemas de telecontrol antes citada contase con datos más precisos sobre los que apoyar la toma de decisiones en la programación del riego.

# Índice Alfabético

---

## A

abastecimiento ..... 77, 100, 108, 117, 118, 142, 149

acequia.... 50, 51, 56, 64, 74, 76, 104, 105, 108, 117, 122, 124, 125, 127, 128, 129, 141, 158

ADOR

ADORcultivos.....91, 92, 95, 99, 119, 125

ADORdecisión.....98, 99, 100, 119

ADOR-gestión.....85, 110, 111, 151, 159, 164

ADORhidrosalino.....95, 96, 97, 119, 127

ADORred..97, 98, 99, 100, 119, 125

ADOR-simulación .... XVIII, XXII, 7, 81, 84, 85, 86, 87, 88, 97, 98, 101, 103, 105, 108, 109, 110, 115, 119, 121, 122, 125, 128, 131, 133, 134, 140, 147, 148, 150, 151, 152, 158, 159, 160, 163, 164

ADORsuperficie..... 89, 90, 91, 100, 105, 119, 125, 126, 127

advección .....35

aforador .....50, 128

agricultor ....XVIII, 4, 46, 50, 51, 54, 56, 59, 64, 70, 72, 73, 74, 76, 77, 84, 86, 93, 105, 119, 120, 122, 127, 128, 129, 131, 136, 138, 139, 140, 142, 143, 145, 157, 158, 159

agricultura ..... 3, 4, 5, 10, 50, 74, 79, 113, 148, 151

agua

agua de riego...XIV, XVII, 3, 6, 51, 55, 58, 74, 77, 79, 84, 86, 88, 89, 95, 96, 104, 107, 128, 136, 141, 159, 164

agua regulada .....128

agua trasvasada .....76

aguas de retorno ..... XV, 88, 96, 118, 127, 139, 141, 142, 144, 146, 148, 149, 160

aguas reutilizadas..... 74, 149, 151

ahorro de agua regulada ..... 147, 148

alfalfa .... 23, 50, 53, 62, 65, 103, 117, 120, 126, 129

algoritmos genéticos..... 83

aluvial..XVI, 48, 52, 61, 62, 64, 65, 66, 67, 70, 71, 135

aprovechamiento .... 4, 45, 46, 59, 72, 75, 76, 83, 99, 110, 146, 148, 158, 160

## B

balance

balance de agua ..... 87, 88, 92, 95, 127, 158

balance de energía..... 21, 27

balance de volumen ..... 91, 92

balance hídrico ..... 93, 95, 128, 140

balance hidrológico ... XVIII, 147, 150, 152, 160

balance hidrosalino ... XVIII, 7, 86, 88, 95, 96, 110, 119, 122, 127, 163

balance salino..... 95, 96

balsa

balsa.. 51, 74, 86, 97, 99, 100, 104, 107, 108, 125, 127, 128, 141, 144

balsa de Bolaso ..... 51

balsa de Moncayuelo..... 51

## C

calibración.. XVIII, 8, 16, 17, 23, 29, 30, 34, 35, 36, 38, 56, 67, 97, 119, 127, 128, 130, 132, 134, 139, 141, 151, 159

calidad

calidad de suministro..... 84

calidad de vida..... 4

calidad del agua..... 67, 84, 96, 126

calidad del riego..... 68, 70, 90, 160

calor  
*calor latente* ..... XVI, 20, 21  
*calor sensible* .....35

campaña  
*campaña de evaluaciones*.....159  
*campaña de riego*... 51, 58, 74, 105, 150, 158

canal  
*Canal de Bardenas* .. 6, XIII, XVII, 5, 8, 43, 46, 47, 50, 117, 118, 123, 127, 128, 141, 142, 144, 146  
*Canal de Urgell*.....5  
*Canal Imperial de Aragón*.....5  
*Canal principal*..... 104, 108

capacidad de retención de agua  
disponible en el suelo.... XIII, 49, 52, 53, 60, 61, 68, 75, 77, 90, 92, 93, 94, 103, 107, 109, 118, 125, 130, 134, 135, 136, 142, 147, 149, 152, 157, 158

captación .....104, 108

caudal  
*caudal de desagüe*.....67  
*caudal de detración*.....98  
*caudal de entrada*..... 55, 108  
*caudal de escorrentía* .... 56, 67, 90, 126  
*caudal de la captación* .....108  
*caudal de la petición* .....93  
*caudal de riego*..... 71, 91, 158  
*caudal de servicio* .... 51, 89, 91, 97, 104, 125, 126  
*caudal de transporte* .....125  
*caudal registrado* .....128  
*caudal unitario* ..... XV, 89

cebada .....121

cebolla .....121

cereales de invierno ..50, 117, 120, 129

ciclo  
*ciclo fenológico*..... 88, 94, 95, 129  
*ciclo hidrológico*.....15  
*ciclo vegetativo* .....61

CIRFLE .....95

colector .....50, 141, 144

comunidad de regantes....XVIII, 7, 8, 45, 46, 51, 77, 79, 81, 84, 85, 88, 98, 103, 104, 108, 110, 112, 115, 119, 122, 140, 149, 150, 151, 152, 158, 159, 160, 163, 164

conclusiones .....38, 75, 110, 150, 155, 157

conductividad eléctrica.... XIII, 103, 104, 109, 148

Confederación Hidrográfica del Ebro . XIII, 39, 59, 75, 79, 112, 128, 130, 131, 132, 133

costra caliza.....59, 60, 61

covarianza de torbellinos .....17, 20, 27

CROPWAT .....11, 92, 111, 113, 152

cultivos de verano ...50, 117, 120, 135, 147

---

## D

demanda  
*demanda de agua* ....XVIII, 5, 10, 50, 51, 61, 76, 85, 106, 117, 120, 121, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 135, 142, 143, 144, 146, 148, 149, 150, 151, 152, 159  
*demanda de agua registrada* .....131, 132  
*demanda de agua simulada*.131, 132  
*demanda evaporativa*.....7, 8, 16, 17, 27, 29, 106  
*demanda potencial de agua* ..... 6, 84  
*demanda total de agua* .....108, 120  
*demanda unitaria de agua*...109, 134

desagüe .... 50, 55, 56, 67, 74, 76, 86, 89, 96, 97, 98, 105, 109, 118, 124, 125, 126, 127, 128, 135, 138, 141, 144, 148, 158

diagnóstico .....XVII, 8, 45, 46

Directiva Marco del Agua.....10, 148

dosis  
*dosis de riego*..... XIII, 57, 58, 65, 69, 91, 118  
*dosis objetivo* ..... 70, 90  
*dosis requerida*...XVI, 53, 55, 57, 58, 61, 62, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 90, 91, 103, 105, 136

---

## E

eficiencia  
*eficiencia de aplicación* ...XIII, XVII, XIX, XXI, 54, 55, 58, 65, 67, 68, 69, 70, 71, 74, 75, 91, 105, 107, 135, 140, 150, 157, 158, 159  
*eficiencia de aplicación potencial* .. XV, 58, 73  
*eficiencia de distribución* .....58  
*eficiencia de riego* .... XIV, 58, 74, 76, 88, 108, 109, 120, 134, 135, 136, 137, 138, 140, 142, 143, 144, 145, 147, 149, 150, 151, 152, 158, 159  
*eficiencia global*.....58, 59, 76, 147, 157, 158

embalse  
*embalse de regulación* .....142, 143  
*embalse de Yesa*... .....47, 117, 128, 129, 148  
*embalse lateral*.....118, 142  
*embalse lateral de Carcastillo* .....118  
*embalse lateral de La Verné*.....118  
*embalse lateral de Malvecino*.....118

energía..... 22, 27, 29, 35  
 escenario ....XVIII, 6, 7, 57, 58, 68, 69,  
 70, 71, 72, 73, 77, 84, 108, 109,  
 124, 134, 140, 141, 142, 143, 144,  
 145, 146, 148, 149, 151, 159  
 escorrentía ..... 50, 55, 67, 68, 76, 90,  
 101, 103, 126, 144  
 estación agrometeorológica..19, 20, 59,  
 103, 120  
 estrés hídrico ....59, 61, 76, 88, 92, 93,  
 94, 100, 106, 109, 110, 117, 126,  
 129, 130, 135, 137, 142, 147, 149,  
 158, 164  
 evaluación del riego.....XVII, 58, 122  
 evaporación..... 21, 22, 61, 95  
 evapotranspiración  
   *evapotranspiración de referencia*...XIII,  
   XIV, XV, XVI, XVII, XIX, XXI, 7, 8, 15,  
   16, 17, 19, 20, 21, 23, 24, 25,  
   26, 27, 28, 29, 30, 32, 34, 35,  
   36, 38, 39, 40, 48, 88, 91, 103,  
   119, 120, 148, 149, 150, 152,  
   157, 160  
   *evapotranspiración del cultivo* ..XVII, 6,  
   15, 59, 92, 94, 109, 126, 134,  
   135, 142, 143, 147, 148, 149,  
   164  
   *evapotranspiración real del cultivo*  
   .....XIV, 92, 93, 94, 109  
 experimental..... 17, 20, 22, 127  
 explotación ..... 4, 49, 73  
 externalidades.....4

## **F**

cultivos forrajeros .....50, 121  
 facturación ..... 59, 85  
 facturaciones ..... 128  
 fenología .....126  
 festuca..... 18, 19, 20, 21, 23, 24  
 flujo  
   *flujo de agua*...XVIII, 7, 8, 55, 56, 64,  
   67, 79, 84, 89, 90, 96, 97, 110,  
   112, 119, 122, 127, 150, 158,  
   163  
   *flujo de aire*.....21  
   *flujo de calor*. XIV, XVI, 19, 20, 21, 27  
   *flujo de retorno*.....95  
   *flujo de sales*..... 6, 95  
   *flujo de vapor*.....21, 27  
   *flujo subsuperficial de agua* ..... 61

## **G**

gestión  
   *gestión administrativa* .....84  
   *gestión de la distribución*..... 51, 150  
   *gestión de la red*..... 74, 134

*gestión de regadíos* ..... 84, 119, 148  
*gestión de zonas regables* ... 6, 15, 83  
*gestión del agua*.... 7, 10, 45, 51, 74,  
 75, 85, 121, 134, 138, 139, 151,  
 160  
*gestión del reparto del agua* ..... 83  
*gestión del riego*... 94, 109, 110, 148  
*gestión en la asignación de*  
   *concesiones*..... 100  
 girasol..... 50, 62, 65, 103, 129, 137  
 guisante..... 121

## **H**

Hargreaves ..... 48  
 hierba ..... 16, 19, 126, 129

## **I**

impacto medioambiental..... 4  
 índice  
   *índice de aprovechamiento*.....XIV, 58,  
   74, 75, 76, 157  
   *índice de similitud* .... XIV, 25, 26, 28,  
   30, 32, 34  
   *índices comparativos* ..... 108  
   *índices de calidad del riego* .... 53, 55,  
   56, 62, 67, 89, 91  
   *índices de evaluación*..... 109  
 infraestructuras..XVII, 6, 45, 46, 50, 56,  
 57, 75, 77, 83, 84, 85, 86, 87, 88,  
 89, 97, 99, 100, 104, 110, 117,  
 119, 121, 150, 151  
 investigación.. 6, 58, 86, 147, 161, 163

## **K**

Kostiakov, ecuación..... XIII, XIV, 55, 63,  
 79, 103

## **L**

lavado de sales..... 53, 95, 96  
 lisímetro..... 17, 19, 27, 29

## **M**

maíz ..... 50, 53, 62, 65, 92, 103, 105,  
 106, 117, 120, 129, 130, 141  
 mallacán ..... 60  
 Manning, rugosidad .....XV, 55, 63, 65  
 material y métodos..... 17, 52  
 medio ambiente..... XVII, XXI, 4, 5, 6, 7,  
 77, 79, 85, 110, 113, 118, 150,  
 151

mejora  
*mejora de la calidad del agua* .....148  
*mejora de la eficiencia* .....4, 77  
*mejora de la gestión*.....XVIII, 6, 7, 46, 58, 74, 75, 105, 108, 110, 119, 138, 140, 141, 144, 145, 150, 151, 158, 159, 160  
*mejora de la productividad*.....XVII, 3  
*mejora de la regulación* .....118  
*mejora de las condiciones de trabajo* .....74  
*mejora de las infraestructuras* .....46, 58, 119, 140, 141, 144, 158  
*mejora del rendimiento*.....3  
*mejora del uso del agua* .... 7, 45, 57, 85, 140  
*mejora en la estimación* .. 34, 35, 97, 164  
minimolinete .....55  
modelizar.....84, 90, 93, 94, 128, 131, 139, 150, 159  
modelo  
*modelo balístico de riego por aspersión* .....46  
*modelo combinado* ..... 86, 147  
*modelo de acción* .....84  
*modelo de agregación de caudales*.84  
*modelo de apoyo a la toma de decisiones*.....84  
*modelo de balance hidrosalino*.84, 95  
*modelo de cultivos* ..... 46, 95, 125  
*modelo de Jarvis*.....16  
*modelo de Katerji y Perrier* .... XIV, 22, 23, 24, 29, 30, 32, 34, 35, 38  
*modelo de regresión lineal* ..... XVI, 25  
*modelo de riego*.....8  
*modelo de simulación* .... XVIII, 6, 45, 46, 57, 77, 81, 83, 84, 92, 101, 115, 119, 127, 146, 158  
*modelo de Todorovic*.....XIV, XV, XVII, 24, 32, 34, 35, 38, 157  
*modelo hidráulico* .....84, 97  
*modelo hidrodinámico*.....XVII, 46, 55, 56, 57, 89  
*modelo hidrogeológico* .....98  
*modelo lineal*..... XIII, 16, 23  
*modelo matemático* .....6  
*modelos de resistencia de la cubierta vegetal* .....30  
modernización de regadíos . . .XVIII, 5, 6, 7, 45, 77, 85, 147, 148, 151, 159, 160

## N

necesidades hídricas..XV, 7, 15, 50, 58, 59, 75, 85, 91, 92, 104, 117, 125, 130, 131, 135, 138, 142, 146, 149

nitratos .....148

## O

optimizar .....91, 148, 164  
ordenación .....99, 100

## P

parcelación.....5, 122  
pedregosidad .....52, 65  
pendiente del terreno.....XIII, XV, XVI, 21, 28, 30, 32, 34, 55, 57, 64, 89, 101, 103, 122, 132  
Penman-Monteith..XIII, XIV, XVII, XIX, XXI, 7, 8, 11, 13, 15, 16, 17, 21, 23, 27, 28, 29, 32, 34, 35, 36, 38, 40, 41, 120, 148, 157  
percolación..... XIV, XV, 62, 68, 76, 92, 93, 96, 97, 98, 105, 144  
pérdidas  
*pérdidas consuntivas*.....126, 147  
*pérdidas de agua*.....53, 64, 97, 126  
*pérdidas de masa*.....19  
*pérdidas de nitratos* .....110, 163  
*pérdidas de sales*.....96  
*pérdidas en colas de acequias* ..... 74  
*pérdidas en la distribución* .....97  
*pérdidas en la red*.....97  
*pérdidas operacionales*139, 140, 164  
*pérdidas por escorrentía*.....97  
*pérdidas por evaporación y arrastre*.....147  
*pérdidas por percolación* ..53, 67, 98, 109, 126  
petrocálcico .....59, 60, 61, 68  
pimiento.....50, 62, 65, 121  
planificación .... XVII, 5, 6, 7, 8, 15, 83, 84, 85, 88, 110, 118, 119, 148, 150, 151, 158  
plataforma..XVI, 48, 52, 61, 62, 64, 65, 66, 67, 68, 70, 71, 72, 73, 76, 135  
precipitación .... XIV, XV, 18, 20, 48, 88, 92, 93, 96, 103, 120, 147  
producción .... 3, 4, 7, 62, 72, 74, 75, 77, 84, 85, 109, 110, 117, 119, 128, 130, 135, 143, 144, 145, 146, 147, 152, 158, 160, 163  
productividad .....6, 83, 164  
profundidad  
*profundidad de agua*.....19  
*profundidad de raíces* .....88  
*profundidad del horizonte del suelo* .....XVI, 53  
*profundidad efectiva del suelo* .....60, 92, 103, 125  
programa 10, 51, 57, 79, 85, 111, 112, 119, 126, 163

programación  
*programación C++* .....101  
*programación de riego* ..XVIII, 58, 164  
*programación lineal* .....83  
programas .....160  
puerro .....121

---

## R

reaprovechamiento ..... 118, 119, 139, 144, 146  
reducción de rendimiento .....120, 135, 137, 138, 139, 143, 146, 149  
referencias .....9, 39, 77, 111, 152  
regadío... XVII, XVIII, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 45, 46, 49, 83, 84, 85, 105, 110, 113, 117, 119, 120, 140, 148, 150, 154, 158, 159, 160  
regante .....XVIII, 7, 45, 51, 74, 75, 84, 108, 110, 118, 150, 158, 159  
regulación ..21, 22, 74, 83, 86, 87, 89, 97, 99, 100, 104, 107, 108, 128, 141, 142, 144  
rendimiento  
*rendimiento de los cultivos*..... XVI, 61, 75, 90, 118, 126, 138, 149, 150, 151  
*rendimiento económico* .....83  
*rendimiento máximo de los cultivos* .... XVI, 94  
*rendimiento real de los cultivos*.....XVI, 94  
resistencia  
*resistencia aerodinámica* .. XV, 16, 17, 21, 22, 24, 35, 126, 147, 158  
*resistencia climatológica*..... XV, 24  
*resistencia crítica*..... XV, 22  
*resistencia de la cubierta vegetal*...XIII, XIV, XV, XVII, XIX, XXI, 8, 13, 16, 17, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 34, 35, 37, 38, 148, 157  
resultados y discusión .....25, 59  
retornos de riego ...XVIII, 50, 51, 85, 95, 97, 105, 108, 109, 119, 135, 144, 147, 151, 152  
reutilización de los retornos ....XVIII, 138, 141, 150, 151, 160  
riego  
*riego a presión* .....XVIII, 75, 77, 141, 152, 158, 159, 160  
*riego por aspersión* .....7, 46, 75, 86, 147, 151, 163  
*riego por goteo* .....75, 147  
*riego por superficie*.....XVII, XVIII, 3, 4, 5, 6, 7, 45, 46, 51, 55, 56, 64, 66, 75, 77, 85, 86, 89, 90, 91, 105, 107, 110, 117, 118, 119,

122, 125, 126, 127, 134, 140, 142, 150, 151, 158, 159, 160  
*riego por surcos* .. 50, 53, 56, 62, 65, 90, 127, 163  
*riego tradicional* ..... 8, 105, 119, 135  
Riegos del Alto Aragón ..... 5  
río  
*río Aragón*..... 47, 117  
*río Arba de Luesia* ..... 50  
*río Ebro* ..... 18  
*río Gállego* ..... 17  
*río Guadalquivir* ..... 20  
*río Riguel* ..... 48, 135, 141, 144

---

## S

Saint Venant ..... 89  
sales .....XIII, XIV, XV, 6, 84, 95, 96, 97, 109, 148  
salinidad .. 10, 48, 53, 78, 88, 95, 110, 113, 127, 163  
salinización..... 4, 77, 152  
sasos..... 48  
semiárido .....XVII, 7, 8, 13, 16, 17, 38, 157  
Sistema de Información GeográficaXV, 6, 56, 84, 85, 111, 119, 123, 163  
sistemas de riego..... 65, 85, 118, 147, 164  
sostenibilidad .....XVII, 4, 5, 7  
suelos  
*suelos aluviales*... 60, 61, 62, 64, 65, 66, 70, 103  
*suelos de plataformas* ..... 53, 59, 60, 61, 62, 65, 66, 68, 69, 70, 71, 75, 77, 103, 125, 129, 130, 136, 142, 147  
surcos..... 62, 64, 65, 66, 67

---

## T

tablar... 53, 54, 55, 56, 57, 62, 64, 65, 66, 67, 68, 70, 72, 74, 76, 88, 90, 91, 94, 101, 103, 105, 106, 107, 118, 122  
tarifas ..... 51, 74, 76, 144  
tecnología ..... 4, 5, 74, 83, 164  
telecontrol ..... 164  
tiempo de corte .... 57, 58, 70, 71, 73, 88, 91, 108, 130, 141, 142  
tiempo de riego .....XVII, 55, 58, 64, 65, 68, 69, 70, 71, 73, 74, 76, 90, 105, 108, 119, 134, 138, 140, 145, 157, 158  
toma de decisiones ....XVIII, 6, 7, 8, 77, 83, 84, 85, 86, 87, 97, 98, 105, 110, 119, 125, 128, 150, 158, 164

tomate .....23, 40, 50, 62, 65  
transferencias de agua.. XVI, 21, 22, 86,  
89, 96, 98, 124, 125, 128, 138,  
141, 144, 158  
trasvase.....74, 76  
trigo .....23  
turno de riego ...51, 56, 57, 58, 64, 67,  
68, 70, 71, 74, 98, 117, 122, 123,  
135, 137, 142

---

## **U**

uniformidad de distribución... XIII, 55, 67  
unidad de riego .... 56, 57, 58, 84, 88,  
90, 91, 110, 122, 125, 126  
unidad de suelos .....48, 61  
uso del agua  
    *uso sostenible del agua* .....4  
    *usos agrícolas del agua* .....148  
    *usos ambientales del agua*.....148  
    *usos beneficiosos del agua* ... 59, 136

*usos consuntivos del agua*..147, 148,  
160  
*usos del agua*..... 3, 4, 7, 45, 58, 74,  
76, 77, 84, 85, 110, 119, 134,  
136, 158  
*usos urbanos del agua* .....148

---

## **V**

validación .... XVIII, 23, 24, 30, 32, 34,  
35, 37, 119, 127, 132, 159  
validado .....86, 147  
validar .....8  
valle  
    *valle del Ebro* ...XVII, 5, 8, 17, 20, 38,  
47, 51, 65, 66, 85, 107, 126,  
127, 135  
    *valle del Guadalquivir* .....17, 20, 38  
variabilidad .... 29, 36, 59, 61, 64, 65,  
68, 70, 90, 92, 103, 106, 107, 125,  
130, 131, 136  
veza ..... 121, 129, 137



