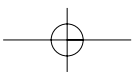
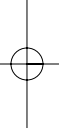
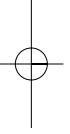


modelo de simulación de flujos de agua  
para la toma de decisiones en la  
modernización y gestión  
de comunidades  
de regantes



sergio Lecina brau



*A mis padres,  
Emilio y Aurora*

**premio tesis doctoral del  
consejo económico y social de Aragón 2005**

**autor de la tesis doctoral**

Sergio Lecina Brau

**directores de la tesis**

Enrique Playán Jubillar  
Antonio Martínez-Cob

**tutor:** Josep M<sup>a</sup> Villar i Mir

**fecha:** Junio, 2004

**calificación obtenida:**

Sobresaliente con laude

**edita:** CONSEJO ECONÓMICO Y SOCIAL DE ARAGÓN

Avda. César Augusto, 30. Ed. Verdi, 1<sup>o</sup> H  
Teléfono: 976 21 05 50 - Fax: 976 21 58 44  
50004 Zaragoza  
Correo electrónico: cesa@aragon.es  
Web: www.ces.aragon.es

**d.l.:** Z-3.062/06

**diseño, preimpresión e impresión:**

Navarro & Navarro, impresores  
Arzobispo Apaolaza, 33-35  
50009 Zaragoza

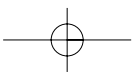
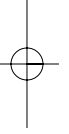
## premios a tesis doctorales CESA 2005

El CES de Aragón con el fin de promover y divulgar la investigación en las materias relacionadas con sus funciones convoca anualmente premios a dos Tesis Doctorales, en cuya convocatoria del año 2005, efectuada por Resolución de 29 de agosto de 2005, de la Presidencia del Consejo Económico y Social de Aragón (B.O.A. nº 107, de 7 de septiembre de 2005), pudieron participar las tesis doctorales presentadas para la colación del grado de doctor, leídas y calificadas de sobresaliente «cum laude», por unanimidad, entre el 1 de octubre de 2004 y el 30 de septiembre de 2005.

Por Resolución de 29 de noviembre de 2005, de la Presidencia del Consejo Económico y Social de Aragón, se otorgaron dos premios a dos tesis doctorales (B.O.A. nº 148, de 14 de diciembre de 2005).

El premio como tesis doctoral ganadora, dotado con 4.000 euros, se otorgó a la tesis doctoral «Modelo de simulación de flujos de agua para la toma de decisiones en la modernización y gestión de comunidades de regantes», realizada por D. Sergio Lecina Brau.

El accésit, con una dotación de 3.000 euros, se otorgó a la tesis doctoral «Determinantes del comportamiento estratégico medioambiental de las empresas industriales de Aragón», realizada por D<sup>a</sup>. Josefina Lucía Murillo Luna.



## CONSEJO ECONOMICO Y SOCIAL DE ARAGON

### COMPOSICION DEL PLENO (a 30/09/2006)

#### PRESIDENTA

D<sup>a</sup>. Ángela López Jiménez (*En representación del Gobierno de Aragón*)

#### VICEPRESIDENTES

D. Jorge Arasanz Mallo (*En representación de las Organizaciones Sindicales*)

D. Fernando Español Buil (*En representación de las Organizaciones Empresariales*)

#### SECRETARIO GENERAL

D. Miguel Angel Gil Condón (*En representación del Gobierno de Aragón*)

#### VOCALES

##### En representación del Gobierno de Aragón

###### Titulares

D. Miguel Angel Gil Condón  
D. José Luis Gracia Abadía  
D<sup>a</sup>. Ángela López Jiménez  
D. Emilio Manrique Persiva  
D. Antonio Mostalac Carrillo  
D. Mariano Ramón Gil  
D. José Félix Sáenz Lorenzo  
D. Marcos Sanso Frago  
D<sup>a</sup>. Teresa Santero Quintillá

###### Suplentes

D. José Aixalá Pasto  
D. José Luis Briz Velasco  
D. Javier Celma Celma  
D<sup>a</sup>. M<sup>a</sup>. José González Ordobás  
D<sup>a</sup>. Carmen Magallón Portolés  
D. José Montón Zuriaga  
D. Jorge Pardo Navarro  
D. Elisardo Sanchís Sancho  
D. Javier Villanueva Sánchez

##### En representación de las Organizaciones Sindicales

*Designados por la Unión General de Trabajadores (UGT):*

###### Titulares

D. Daniel Alastuey Lizáldez  
D. Francisco Catalán Duerto  
D. Julián Lóriz Palacio  
D. Agustín Redondo Aínsa  
D. Luis Tejedor Cadenas

###### Suplentes

D. José B. Butera Aured  
D. Javier Franco Enguita  
D. Luis Laguna Miranda  
D. Carmina Melendo Vera  
D. José Manuel Solanas Pontaque

*Designados por la Comisiones Obreras (CCOO):*

**Titulares**

D. Jorge Arasanz Mallo  
D. Julián Buey Suñén  
D<sup>a</sup>. Eva Murillo Alvarez  
D. Eduardo Navarro Villareal

**Suplentes**

D<sup>a</sup>. Marta Arjol Martínez  
D. Carmelo Asensio Bueno  
D<sup>a</sup>. Marga Lasmarías Bustín  
D. Javier Sánchez Ansó

**En representación de las Organizaciones Empresariales**

*Designados por la Confederación Regional de Empresarios de Aragón (CREA):*

**Titulares**

D. Salvador Coreo Bergua  
D<sup>a</sup>. Rosa Santo Fernández  
D. José María García López  
D. José Enrique Ocejo Rodríguez  
D. Víctor Hinojosa Luna

**Suplentes**

D<sup>a</sup>. Beatriz Callén Escartín  
D. José M<sup>a</sup> Cester Beatobe  
D. Juan Carlos Dehesa Conde  
D<sup>a</sup>. Rosa García Torres  
D<sup>a</sup>. Belén Ortíz López

*Designados por la Confederación de la Pequeña y Mediana Empresa Aragonesa (CEPYME ARAGÓN):*

**Titulares**

D. José Luis Estallo Lacasta  
D. Fernando Español Buil  
D. Carmelo Pérez Serrano  
D. Enrique Boyorta Rico

**Suplentes**

D<sup>a</sup>. Pilar Gómez López  
D. Antonio Hinojal Zubiaurre  
D<sup>a</sup>. Pilar Elícegui Motis  
D. Carlos Salcedo Merino

## JURADO DE CALIFICACIÓN DE TESIS 2005

### PRESIDENTE

Emilio Manrique Persiva *(En representación del Gobierno de Aragón)*

### VOCALES TITULARES

Javier Celma Celma *(En representación del Gobierno de Aragón)*

Beatriz Callén Escartín *(En representación de las Organizaciones Empresariales)*

Javier Franco Enguita *(En representación de las Organizaciones Sindicales)*

José Aixalá Pastó *(En calidad de experto)*

Eva Martínez Salinas *(En calidad de experta)*

### SECRETARIO

Miguel Ángel Gil Condón *(Secretario General del CES en Aragón)*



## ÚLTIMAS PUBLICACIONES DEL CONSEJO ECONÓMICO Y SOCIAL DE ARAGÓN

### Informes anuales

- Informe sobre la situación económica y social de Aragón 2005

### Memorias de actividades

- Memoria de Actividades 2005

### Colección Estudios

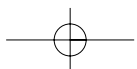
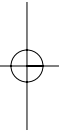
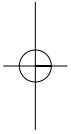
- Estructura productiva, infraestructuras y dotación de servicios en las Comarcas Aragonesas.
- Un análisis empírico del precio de la vivienda en Aragón.
- Derecho de la competencia y mercados regionales y locales.

### Colección Tesis Doctorales

- Evaluación de las consecuencias ambientales de las sequías en el sector central del Valle del Ebro mediante imágenes de satélite: Posibles estrategias de mitigación
- Influencia de las características psicográficas y de conocimiento en el comportamiento del consumidor ecológico: una aplicación empírica.

### Dictámenes emitidos

- Dictamen del Consejo Economico y Social de Aragón sobre el anteproyecto de ley de mediación familiar en Aragón.
- Dictamen del Consejo Economico y Social de Aragón sobre el anteproyecto de ley reclamaciones económico-administrativas en la CCAA de Aragón.
- Dictamen del Consejo Economico y Social de Aragón sobre el anteproyecto de ley de actividades feriales en Aragón.
- Dictamen sobre el Anteproyecto de Ley de Cámaras Oficiales de Comercio e Industria de la Comunidad Autónoma de Aragón.
- Dictamen sobre la reforma del Estatuto de Autonomía de Aragón.
- Dictamen sobre el Anteproyecto de Ley de reforma de la Ley 9/1989, de 5 de octubre, de Ordenación de la Actividad Comercial en Aragón.



## 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.

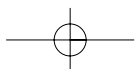
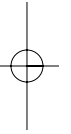
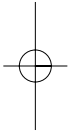
Al Ministerio de Ciencia y Tecnología del Gobierno Español, y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) de la Unión Europea, al financiar los proyectos de investigación en los que se ha desarrollado esta Tesis.

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.

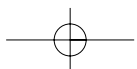
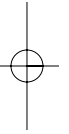
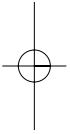


## Índice

<b>Presentación</b> .....	5
<b>1. Introducción</b> .....	15
<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> .....	27
2.1 Introducción.....	29
2.2 Material y métodos.....	31
2.2.1 Descripción de las zonas experimentales.....	31
2.2.1.1 El valle del Ebro .....	31
2.2.1.2 El valle del Guadalquivir.....	33
2.2.2 Cálculos de $ET_0$ .....	34
2.2.2.1 La ecuación de Penman-Monteith.....	34
2.2.2.2 El modelo de Katerji y Perrier.....	35
2.2.2.3 El modelo de Todorovic.....	36
2.3 Análisis estadísticos .....	38
2.3 Resultados y discusión.....	38
2.3.1 Estimación con valores de $r_c$ fijos.....	39
2.3.2 Calibración del modelo de Katerji y Perrier .....	42
2.3.3 Estimación con valores de $r_c$ variables.....	43
2.4 Conclusiones.....	49
2.5 Bibliografía.....	50

<b>3. Evaluación y mejora de los riegos de la Comunidad de Regantes V del Canal de Bardenas</b> .....	53
3.1 Introducción.....	55
3.2 La Comunidad de Regantes V del Canal de Bardenas.....	56
3.3 Material y métodos.....	61
3.3.1 Estudio de los suelos.....	61
3.3.2 Evaluación del riego a escala de parcela.....	63
3.3.3 Evaluación del riego a escala de comunidad.....	66
3.3.3.1 Aproximación basada en la simulación.....	66
3.3.3.2 Aproximación hidrológica.....	68
3.4 Resultados y discusión.....	69
3.4.1 Estudio de los suelos.....	69
3.4.2 Evaluación del riego a escala de parcela.....	72
3.4.3 Evaluación del riego a escala de comunidad.....	77
3.4.3.1 Aproximación basada en la simulación.....	77
3.4.3.2 Aproximación hidrológica.....	83
3.5 Conclusiones.....	84
3.6 Bibliografía.....	86
<b>4. ADOR-simulación, un modelo para la simulación de los flujos de agua en comunidades de regantes: descripción del modelo</b> .....	91
4.1 Introducción.....	93
4.2 Descripción del modelo.....	95
4.2.1 ADORsuperficie: módulo de simulación de riego por superficie.....	98
4.2.2 ADORcultivos: módulo de simulación de cultivos.....	100
4.2.3 ADORhidrosalino: módulo de simulación hidrosalino.....	104
4.2.4 ADORred: módulo de simulación de infraestructuras de riego.....	106
4.2.5 ADORdecisión: módulo de simulación de toma de decisiones en la distribución de agua.....	107
4.2.6 Implementación informática del modelo.....	110
4.3 Ejemplo de aplicación.....	112
4.4 Conclusiones.....	119
4.5 Bibliografía.....	120

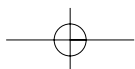
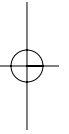
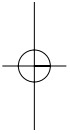
<b>5. ADOR-simulación, un modelo para la simulación de los flujos de agua en comunidades de regantes: aplicación del modelo</b> .....	125
5.1 Introducción.....	127
5.2 Caracterización del periodo de estudio .....	129
5.3 Planteamiento de las simulaciones con ADOR-simulación.....	131
5.4 Calibración y validación del modelo .....	137
5.5 El uso del agua en la CRV durante los años 2000 y 2001 .....	143
5.6 Escenarios de mejora del uso del agua en la CRV.....	149
5.7 Influencia de la precisión de la estimación de la evapotranspiración de referencia en la simulación.....	157
5.8 Conclusiones.....	159
5.9 Bibliografía.....	161
<b>6. Conclusiones generales</b> .....	165
<b>7. Recomendaciones para la investigación futura</b> .....	171
<b>Glosario de símbolos</b> .....	175
<b>Índices</b> .....	183
Índice de Tablas .....	185
Índice de figuras .....	187





presentación





## presentación

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 comu-

nidad 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 (cinco) (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 cómo, 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 tam-



bién 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.

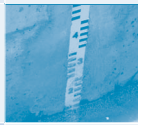
Esta Tesis ha aportado herramientas, así como una aproximación metodológica, para generar información que permita optimizar el apoyo a la toma de decisiones en los procesos de planificación y gestión del regadío, con el fin de contribuir a su sostenibilidad medioambiental, económica, y social. Las capacidades 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.

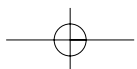
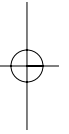
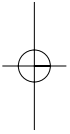
Los resultados obtenidos se ven avalados desde un doble ámbito. Científicamente, los cuatro capítulos desarrollados han sido publicados en forma de artículos en revistas científicas europeas y estadounidenses incluidas en las listas del *Science Citation Index* (SCI). Técnicamente, los resultados de 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, dichos resultados 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.



# 1. Introducción





## 1.1 Introducción

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 comprenden 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 (cinco) 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 bibliografía

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 n° 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., 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.

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., 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. 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.