



**Mejora de la gestión de los recursos  
hídricos por medio de la integración  
de técnicas de teledetección y  
modelos de simulación  
(accésit)**

Cristina Santos Rufo / Ignacio J. Lorite Torres  
Richard G. Allen / Masahiro Tasumi  
Pedro Gavilán Zafra / Elías Fereres Castiel

IX Premio Unicaja de Investigación Agraria





**Mejora de la gestión de los recursos  
hídricos por medio de la integración  
de técnicas de teledetección y modelos  
de simulación  
(accésit)**

Cristina Santos Rufo / Ignacio J. Lorite Torres  
Richard G. Allen / Masahiro Tasumi  
Pedro Gavilán Zafra / Elías Fereres Castiel


IX Premio Unicaja de Investigación Agraria



*Reunidos en la Ciudad de Málaga el día 24 de Mayo de 2007 un jurado presidido por Braulio Medel Cámara y compuesto por Isaías Pérez Saldaña, José Javier Rodríguez Alcaide, José Emilio Guerrero Ginel, José Manuel Domínguez Martínez y Francisco Villalba Cabello, decidió por unanimidad conceder a esta investigación el accésit del IX PREMIO UNICAJA DE INVESTIGACIÓN AGRARIA. El premio fue convocado por Analistas Económicos de Andalucía en el otoño de 2006 y cuenta con el patrocinio de la Fundación UNICAJA.*

## **Mejora de la gestión de los recursos hídricos por medio de la integración de técnicas de teledetección y modelos de simulación**

### **Equipo de Investigación y Edición**

<b>Investigación</b>	Cristina Santos Rufo, Ignacio J. Lorite Torres Richard G. Allen, Masahiro Tasumi Pedro Gavilán Zafra, Elías Fereres Castiel
<b>Producción y Coordinación Gráfica</b>	M <sup>a</sup> Dolores Fernández-Ortega Jiménez
<b>Administración</b>	Rosa Díaz Montañez
<b>Proyecto, Realización, y Edición</b>	 Analistas Económicos de Andalucía

## **Elaboración:**

### **Analistas Económicos de Andalucía**

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

Tel.: 952 22 53 05 - 06

Fax: 952 21 20 73

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

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

D.L.: MA-57-2008

I.S.B.N.: 978-84-95191-98-4

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

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

© Analistas Económicos de Andalucía, 2007

# Mejora de la gestión de los recursos hídricos por medio de la integración de técnicas de teledetección y modelos de simulación

---

Índice

	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	13
<b>CAPÍTULO I</b>	<b>LA EVAPOTRANSPIRACIÓN: CONCEPTO Y MÉTODOS PARA SU DETERMINACIÓN</b> .....	19
	I.1 Evapotranspiración .....	21
	I.2 Conceptos básicos en la evapotranspiración.....	21
	I.3 Medida de la evapotranspiración.....	23
<b>CAPÍTULO II</b>	<b>ÁREA DE ESTUDIO Y RECOPIACIÓN DE DATOS</b> .....	27
	II.1 Zona regable de Genil - Cabra .....	29
	II.2 Zonas de validación y calibración de los modelos .....	31
<b>CAPÍTULO III</b>	<b>BALANCE DE ENERGÍA BASADO EN IMÁGENES PROCEDENTES DE SATÉLITE Y EL MODELO METRIC</b> ...	33
	III.1 Componentes del balance de energía.....	36
	III.2 Aplicación del modelo METRIC en el Valle del Guadalquivir .....	39
<b>CAPÍTULO IV</b>	<b>DETERMINACIÓN DE NECESIDADES DE RIEGO POR MEDIO DEL EMPLEO DE MODELOS DE BALANCE DE AGUA EN PARCELA</b> .....	45
	IV.1 Planificación del riego.....	47
	IV.2 Integración de METRIC y el balance de agua en el suelo...	49
<b>CAPÍTULO V</b>	<b>INTEGRACIÓN DEL MODELO METRIC Y DEL MODELO DE BALANCE DE AGUA LORMOD</b> .....	51
	V.1 Resultados de la aplicación de METRIC en el Valle del Guadalquivir .....	53
	V.2 Resultados de la integración de METRIC y el modelo de balance de agua en el suelo en la zona regable del Genil-Cabra.....	61
<b>CAPÍTULO VI</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	69
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	73

# Presentación

Braulio Medel Cámara. Presidente de Unicaja

# U

NICAJA ha patrocinado, un año más -en este caso, en su novena edición- el **Premio UNICAJA de Investigación Agraria**, serie iniciada en 1998, en su continuado esfuerzo de apoyar al complejo agroalimentario andaluz, término que engloba al sector primario y a la industria agroalimentaria, dado el decisivo papel que juega no sólo en la economía y sociedad de nuestra Comunidad Autónoma, como generador de renta y fuente de empleo en buena parte del territorio andaluz, sino también como eje vertebrador del territorio, contribuyendo además a un desarrollo sostenible, mediante prácticas respetuosas con el medio ambiente, la protección de la biodiversidad, el mantenimiento del paisaje y la cultura del medio rural. El cumplimiento de este compromiso adquirido por Unicaja de promover el conocimiento científico en el campo de la investigación agraria, tan determinante en un mundo cada día más globalizado y en continuo proceso de adaptación por parte de los agricultores a las sucesivas reformas de la Política Agrícola Común, se consolida con la elaboración del Informe Anual del Sector Agrario en Andalucía, que ya ha alcanzado su decimoséptima edición, trayectoria que viene siendo paralela a la de la propia entidad.

En la novena convocatoria, se otorgó un accésit al estudio "Mejora de la Gestión de los Recursos Hídricos por medio de la Integración de Técnicas de Teledetección y Modelos de Simulación", presentado bajo el seudónimo "KIMBERLY", equipo en el que figura como investigador principal Dña. Cristina Santos Rufo, del Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria y compuesto por D. Ignacio Lorite Torres, D. Richard Allen, D. Masahiro Tasumi, D. Pedro Gavilán Zafra y D. Elías Fereres Castiel, profesores de la Universidad de Idaho y Córdoba. En esta investigación, el Jurado ha valorado la enorme actualidad del tema tratado y su aplicabilidad en amplias áreas de cultivo en Andalucía.

El desarrollo de herramientas que permitan mejorar la eficiencia y la gestión del agua de riego es imprescindible para asegurar la sostenibilidad de los regadíos andaluces. En ese sentido, en este trabajo se presentan los resultados de la aplicación de un modelo, que emplea imágenes del satélite Landsat 5 para la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos. Junto a las técnicas de teledetección se emplea un modelo de simulación de balance de agua que permite realizar el seguimiento del cultivo y el contenido de agua en el suelo con escala diaria en los periodos en los que la información procedente del satélite no está disponible. La integración de ambos modelos, proporciona calendarios de riegos adecuados a las necesidades específicas de cada cultivo y parcela.



Se efectuó una aplicación para el caso de la Zona Regable del Genil - Cabra (Córdoba), durante la campaña 2004-05, donde dicha integración supuso un ahorro en el riego del algodón del 23% respecto a la metodología tradicional, mientras que en el caso de la remolacha se detectó un incremento del 21% debido al aumento en la longitud de su ciclo por problemas en el establecimiento del cultivo tras las heladas que se produjeron durante el invierno. En definitiva, se trata de una metodología de utilidad para cuantificar y mejorar el manejo del riego a escala de parcela cuando la información disponible es escasa.

La Fundación UNICAJA, a través de su Servicio de Publicaciones, edita la presente investigación, que se encuadra dentro del conjunto de premios que promueve nuestra entidad, incorporándose a la amplia lista de documentos ya publicados, con la firme convicción de que estos estudios y la difusión de sus resultados servirán de referencia de primer orden para los profesionales, instituciones, la comunidad científica y entre los agentes económicos y sociales relacionados con el sector, como fuente de conocimiento para generar avances tecnológicos que sean instrumento y motor del desarrollo regional en el ámbito agrario, que permita mejorar su competitividad y rentabilidad, contribuyendo a la modernización de la sociedad andaluza. Por todo ello, es nuestro deseo que esta edición tenga la favorable acogida de años anteriores, y que contribuya a la cubrir las necesidades de información del sector y, en general, de la sociedad andaluza en su conjunto.



## **Introducción**

## I. INTRODUCCIÓN

La agricultura de regadío debe afrontar actualmente diferentes retos; desde satisfacer la demanda de alimentos requerida por una población mundial que va en aumento, hasta asegurar un uso sostenible de los recursos, respetuoso con el medio ambiente que evite la sobreexplotación y la contaminación de los mismos.

Se estima que la demanda de agua en España es de 35.000 hm<sup>3</sup> / año, destinándose un 70% de esta cantidad al riego y el resto a todos los demás usos (MIMAM, 1998). Por este motivo, la modernización de la agricultura de regadío ya no se reduce únicamente a la introducción de nuevas infraestructuras, sino a desarrollar herramientas de gestión que permitan mejorar la eficiencia y el manejo del agua de riego.

Periodos de sequía como el actual hacen que el manejo del riego de manera eficiente sea cada día más imprescindible para lograr una agricultura sostenible en el tiempo. Así, la campaña de riegos 2004/05 fue una de las más secas en la historia reciente (223 mm), si bien el riego se desarrolló con normalidad gracias a los recursos almacenados en años precedentes. Sin embargo, durante la campaña 2005/06 las restricciones en el regadío han sido muy importantes (la dotación concedida a los regantes ha sido de únicamente 2.000 m<sup>3</sup>/ha), limitando en gran medida el desarrollo de los cultivos, especialmente en las zonas regables con una deficiente gestión del riego.

En los últimos años algunas nuevas tecnologías han supuesto un avance muy importante para el estudio y mejora de la gestión del riego en grandes zonas regables, como la teledetección, los modelos de simulación y los Sistemas de Información Geográfica.

En el caso de la teledetección, los sensores remotos proporcionan información sobre importantes variables que caracterizan la superficie terrestre y los procesos que sobre ella ocurren. Sus datos, espacialmente distribuidos, proporcionan información de grandes zonas a modelos desarrollados de forma localizada, apoyándose en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y en información meteorológica. Por otro lado, los modelos de simulación permiten estudiar y cuantificar todos los procesos que definen el funcionamiento y comportamiento de una zona regable (balance de agua en el suelo, distribución del agua por la red de distribución, crecimiento y desarrollo de los cultivos, efectos del estrés sobre el rendimiento, estrategias de riego, etc.) y constituyen una

herramienta imprescindible para la evaluación de las prácticas de riego, permitiendo determinar las necesidades actuales y futuras de la zona regable.

El uso más frecuente de la teledetección en los sistemas agrícolas de regadío es la estimación de la evapotranspiración real de los cultivos. La evapotranspiración (ET) es la combinación de dos procesos mediante los cuales se transfiere agua hacia la atmósfera, debido a la evaporación desde el suelo y a la transpiración de las plantas. La mayor parte del agua absorbida por la planta es empleada en transpiración (Rosenberg et al., 1983), fijando la planta sólo una fracción despreciable (~1%). La determinación de la evapotranspiración de los cultivos es la principal información para estimar las necesidades hídricas de los mismos y aplicar así el riego en la cuantía adecuada (Doorenbos y Pruitt, 1977; Allen et al., 1998). A su vez, la ET se considera uno de los componentes más importantes en el balance de agua a escala regional, siendo el principal mecanismo en la redistribución de la energía a través de la circulación atmosférica, con consecuencias medioambientales muy importantes. Por todo ello, una cuantificación precisa de la ET constituye una herramienta fundamental en el manejo del agua en la agricultura.

Esta estimación precisa de la ET permite la realización de múltiples aplicaciones, como su inclusión en balances de agua, análisis de variabilidad espacial, identificación de situaciones de estrés, etc. Todas estas aplicaciones son útiles para llevar a cabo un asesoramiento directo a los agricultores en el riego, con el fin de aumentar la eficiencia en el uso del agua.

Son muchos los grupos que han desarrollado herramientas que utilizan estas nuevas tecnologías, como el profesor Bastiaanssen y su equipo con el modelo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithms for Land*) (Bastiaanssen et al., 1998), que combina los modelos de balance de energía con técnicas de teledetección. Igualmente, el modelo METRIC (*Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration*) desarrollado en la Universidad de Idaho (Allen et al., 2007a), y basado en el modelo SEBAL, también ha proporcionado excelentes resultados en diferentes zonas regables (Allen et al., 2007b) estimando de forma precisa la evapotranspiración real de los cultivos.

El empleo de técnicas de teledetección se basa en el empleo de imágenes procedentes de satélites de observación de la superficie terrestre como Landsat, MODIS o ASTER, siendo el más frecuentemente usado el Landsat 5 TM. Sin embargo, el empleo de este satélite presenta algunos problemas derivados de la deficiente escala temporal, puesto que las imágenes son recogidas, en el mejor de los casos, cada 16 días, no contando con información en el periodo entre imágenes. Para resolver este problema, en este trabajo se presenta una

metodología de integración de la información proporcionada por METRIC con un modelo de balance de agua previamente adaptado a las condiciones del Valle del Guadalquivir denominado LORMOD (Lorite et al., 2004a). Este modelo está basado en el Manual FAO nº 56 (Allen et al., 1998) y ha sido empleado para la determinación de las necesidades hídricas de los cultivos (Lorite et al., 2004b). Este procedimiento permite llevar a cabo una gestión de los recursos hídricos adecuada a las necesidades específicas de cada cultivo y parcela, con lo que se consigue que el calendario de riego propuesto evite situaciones de estrés o sobrerriego. La integración de diferentes técnicas se constituye así como una herramienta capaz de conseguir un uso más eficiente de los recursos hídricos a nivel de parcela y zona regable.

Además, utilizando la ET distribuida espacialmente que proporciona METRIC, junto con registros reales de volumen de agua aplicada a nivel de parcela, se han estimado valores de eficiencia de riego en la zona regable, lo cual permite identificar aquellas parcelas que podrían necesitar mejoras en el manejo y gestión del riego por su baja eficiencia en la aplicación del riego. Esta metodología se constituye así como una herramienta de suma utilidad para los Servicios de Asesoramiento al Regante andaluzes, y próximamente comenzará su utilización en varias zonas regables del Valle del Guadalquivir.

En este trabajo se ha empleado el modelo METRIC para la determinación de las necesidades hídricas de los cultivos mediante el cálculo de la evapotranspiración (ET) en varias zonas regables del Valle del Guadalquivir. El modelo METRIC, debido a su desarrollo en condiciones muy diferentes a las del Valle del Guadalquivir, ha sido calibrado y adaptado a las condiciones regionales andaluzas. La información para alimentar el modelo han sido once imágenes del satélite Landsat 5 TM, con fechas comprendidas entre el 13 de Noviembre de 2004 y el 29 de Septiembre de 2005, con lo cual se abarca completamente la campaña de riegos 2004/05, e información climática proporcionada por la Red de Información Agroclimática (RIA) (Gavilán et al., 2006).

El área de estudio se centró principalmente en la Zona Regable del Genil – Cabra (Córdoba), aunque para poder llevar a cabo la validación y calibración de los modelos también se seleccionaron varias parcelas en la Zona Regable del Guadalquivir y varias explotaciones del Valle medio del Guadalquivir. La elección de estas zonas fue debida a la existencia de información precisa sobre volumen de agua aplicado en parcela, cultivos y prácticas de manejo del riego.

A photograph of an orange grove. The trees are lush green with many leaves. The ground is covered with dry leaves and twigs. Several orange fruits are visible on the ground. A black drip irrigation line runs across the ground, with small white emitters spaced along it. A white stake is visible in the foreground.

# La evapotranspiración: concepto y métodos para su determinación

Capítulo I

# I. LA EVAPOTRANSPIRACIÓN: CONCEPTO Y MÉTODOS PARA SU DETERMINACIÓN

## I.1 Evapotranspiración

La evaporación es el proceso por el cual el agua pasa de fase líquida a fase de vapor, desde la superficie a la atmósfera. El agua puede evaporarse desde una gran variedad de superficies tales como suelos, lagos, ríos, y vegetación húmeda. Este cambio de fase requiere un aporte de energía, proporcionado fundamentalmente por la radiación solar y, en menor grado, por el aire que circunda la superficie evaporante.

La transpiración consiste en la vaporización de agua líquida contenida en los tejidos de la planta y en el transporte del vapor de agua a la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de los estomas y, en menor medida, a través de la cutícula. Los estomas son pequeñas aberturas en las hojas a través de las cuales circulan el vapor de agua y otros gases como el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{O}_2$ . Es de resaltar que casi toda el agua absorbida por la planta es transferida a la atmósfera mediante este proceso, manteniéndose en su interior sólo una fracción mínima. La transpiración depende, al igual que la evaporación, del suministro de energía para el cambio de fase, junto con el gradiente de presión de vapor entre el aire húmedo saturado del espacio intercelular y la atmósfera circundante, que es la fuerza impulsora para el transporte de vapor a través de los estomas. Influye además la interacción del viento con la superficie, para el transporte del aire húmedo de la cubierta a la atmósfera libre.

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay forma sencilla de separar ambos procesos, por lo que al flujo de vapor de agua desde una cubierta vegetal se le denomina de forma general evapotranspiración (ET). La proporción de evaporación y transpiración en un cultivo cambia según las diferentes fases de desarrollo y crecimiento. Así, cuando el cultivo está en las primeras fases de desarrollo predomina el suelo desnudo, y el principal proceso es el de evaporación. Al desarrollarse el cultivo va cubriendo progresivamente el suelo hasta alcanzar la cobertura máxima. Cuando el cultivo llega a cubrir totalmente el suelo, la transferencia de agua a la atmósfera se deberá fundamentalmente a la transpiración.

## I.2 Conceptos básicos en la evapotranspiración

La evapotranspiración real es la tasa de transferencia de agua a la atmósfera que tiene el cultivo en un momento determinado. Para conocer su valor son necesarios una serie de conceptos de gran importancia que a continuación se exponen.

### **1.2.1 Evapotranspiración de referencia: $ET_o$ o $ET_r$**

La evapotranspiración de referencia se refiere a la que tiene una superficie en óptimas condiciones de crecimiento y bajo un adecuado suministro de agua. La superficie de referencia es un cultivo herbáceo ideal, pudiendo ser una pradera de gramíneas, como es el caso de la festuca ( $ET_o$ ) o una pradera de alfalfa ( $ET_r$ ), más comúnmente usada como referencia en Estados Unidos. Al considerar un buen suministro de agua en el suelo, el agua disponible en él y las características del suelo no afectan al ritmo de evapotranspiración.

Este concepto se introduce para estudiar la demanda evaporativa de la atmósfera independientemente del tipo de cultivo, de su estado de desarrollo y de su manejo. Dada su definición, los factores que afectan a la evapotranspiración de referencia son los factores climáticos, pudiendo ser calculada con parámetros climatológicos (temperatura, humedad relativa de la atmósfera, velocidad del viento, etc.).

La evapotranspiración de referencia que utiliza una pradera de gramíneas como cultivo de referencia ( $ET_o$ ) y recomendada por el Manual FAO n° 56 (Allen et al., 1998), es la más utilizada en nuestro ámbito de estudio. La ecuación que permite su cálculo es la denominada FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

Sin embargo, en Estados Unidos se utiliza frecuentemente la alfalfa como cultivo de referencia para el cálculo de la evapotranspiración de referencia ( $ET_r$ ), empleando la ecuación ASCE Penman-Monteith (ASCE-EWRI, 2005). Esta ecuación es válida tanto para el cálculo de  $ET_o$  como  $ET_r$ , y tanto para intervalos diarios como horarios.

### **1.2.2. Coeficiente de cultivo $K_c$**

El coeficiente de cultivo se define como el cociente entre la evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar y la evapotranspiración de referencia:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (1)$$

Este coeficiente refleja las diferencias entre el cultivo y la superficie de referencia. Como las características de un cultivo cambian con las distintas fases de crecimiento, los valores del coeficiente de cultivo describen una curva a lo largo del ciclo del cultivo cuya forma refleja los cambios en la vegetación y en la cobertura vegetal debidos al crecimiento y maduración en el ciclo de crecimiento del cultivo. Conociendo el coeficiente de cultivo en un determinado instante se puede obtener la evapotranspiración real del cultivo, utilizando la evapotranspiración de referencia, calculada anteriormente con parámetros climáticos.



Para tener en cuenta de forma independiente la evaporación del suelo desnudo y la transpiración de la vegetación, el coeficiente de cultivo se puede dividir en dos términos: el coeficiente de cultivo basal  $K_{cb}$ , para la transpiración, y la fracción correspondiente a la evaporación desde el suelo,  $K_e$ , según el criterio del Manual FAO n° 56 (Allen et al., 1998):

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (2)$$

El coeficiente de cultivo basal se define como el cociente entre la transpiración del cultivo y  $ET_o$ , cuando el contenido de agua en la zona radicular es el adecuado para que la transpiración se produzca sin ninguna limitación, de tal forma que el crecimiento del cultivo sea el máximo.

El coeficiente de evaporación del suelo  $K_e$  expresa la componente de evaporación desde la superficie del suelo. El valor de  $K_e$  puede ser alto tras un episodio de lluvia o riego con un cultivo con baja cobertura del suelo, pero conforme la capa más externa del suelo se seca, su valor disminuye y tiende a cero. La estimación de este coeficiente requiere un balance de agua diario que estime el contenido en agua de la capa superficial (Allen et al., 1998).

### 1.3 Medida de la evapotranspiración

La estimación precisa de la evapotranspiración no es una tarea simple. Los procedimientos requieren el control continuo de un gran número de parámetros físicos, meteorológicos y de la cubierta vegetal. Según el principio en que se basan los equipos de medida, se distinguen los siguientes métodos:

#### 1.3.1. Método del balance de energía

La evapotranspiración es uno de los principales flujos de energía en el intercambio energético entre la superficie terrestre y la atmósfera. El cambio de fase requiere una gran cantidad de energía, por lo que está limitada a la cantidad de energía disponible. Debido a esta limitación, es posible predecir la cantidad de evapotranspiración aplicando el principio de conservación de la energía según el cual, la energía que llega a la superficie debe ser igual a la energía que sale de la misma, dentro de un periodo determinado.

La ecuación del balance de energía de una superficie, considerando sólo los flujos verticales es la siguiente:

$$R_n = G + \lambda ET + H \quad (3)$$

donde:

$R_n$  = Radiación neta en la superficie ( $W m^{-2}$ ), es la energía intercambiada por radiación.

$G$  = Flujo de energía en forma de calor intercambiado por conducción entre la superficie del cultivo y el suelo ( $W m^{-2}$ ).

$\lambda ET$  = Calor latente, es el flujo de energía en forma de calor asociado al flujo de vapor de agua ( $W m^{-2}$ ). Esta es la energía que se requiere para el proceso de evaporación. Así  $\lambda$  es el calor latente de vaporización, es decir, la energía necesaria para evaporar la unidad de masa.

$H$  = Calor sensible, es el flujo de energía en forma de calor intercambiado por convección entre la superficie y la atmósfera ( $W m^{-2}$ ), es decir debido a la diferencia de temperaturas entre la superficie y la atmósfera.

En la ecuación del balance de energía se han considerado una serie de simplificaciones, atendiendo en general al valor relativo de los flujos de energía, así como al intervalo temporal en que será aplicada. Así, se ha considerado que flujos como el relativo al proceso de fotosíntesis o el almacenado en el sistema constituyen una porción despreciable del balance de energía (Hillel, 1998). Tampoco se ha tenido en cuenta el flujo de energía horizontal, llamado advección, puesto que su aplicación está indicada en grandes superficies de vegetación.

El flujo de vapor de agua,  $ET$ , es la masa de agua transportada por unidad de tiempo y unidad de superficie ( $kg m^{-2}s^{-1}$ ) en el Sistema Internacional (SI). Es usual considerar en lugar de masa, el volumen de agua transportado. Para una densidad del agua de  $1000 kg m^{-3}$ , la  $ET$  puede expresarse en milímetros ( $l m^{-2}$ ) por unidad de tiempo. Este flujo de vapor de agua se obtiene a partir de la ecuación del balance de energía, dividiendo el calor latente  $\lambda ET$  (que puede venir expresado también en  $MJ m^{-2} día^{-1}$ ) entre el calor latente de vaporización,  $\lambda$ , que es la cantidad de energía necesaria para vaporizar la unidad de masa de agua. El valor de  $\lambda$  depende de la temperatura.

Además del empleo de técnicas de teledetección para la estimación del balance de energía, existen otros procedimientos que requieren una instrumentación específica para la medida de la  $ET$ , como el método de la razón de Bowen, que calcula la evapotranspiración mediante medidas de los gradientes verticales de la temperatura del aire y del vapor de agua. Otro método es el de covarianza de torbellinos (*eddy covariance*), en el que se mide directamente la componente vertical instantánea de la velocidad del viento mediante un anemómetro tridimensional, a la vez que se obtienen concentraciones instantáneas de vapor de agua. Ambos procedimientos obtienen valores puntuales de  $ET$ .

### 1.3.2. Método basado en el balance hídrico del suelo

La evapotranspiración puede ser determinada por la medida de varios componentes del balance hídrico del suelo. Este método consiste en determinar las entradas y salidas del flujo de agua en la zona del suelo ocupada por las raíces en un determinado intervalo temporal. Los aportes de agua vienen dados por el riego (R) y la lluvia (P), mientras que las pérdidas pueden ser por escorrentía superficial (Es) y percolación profunda (D). Además, si el nivel freático se encuentra a escasa profundidad de las raíces, también aportará agua el ascenso capilar, mientras que en caso de pendientes en el terreno habría que considerar entradas y salidas de flujos subsuperficiales (Fs). En este trabajo ninguno de estos dos componentes han sido considerados.

Finalmente, la evaporación desde el suelo y la transpiración desde las plantas extraen agua de la zona de las raíces. Si todos estos flujos son medidos, la evapotranspiración puede deducirse, teniendo también en cuenta el cambio en el almacenamiento de agua en el suelo ( $\Delta w$ ), para cuya determinación se pueden emplear técnicas de gravimetría.

La ecuación del balance hídrico presenta la siguiente forma:

$$ET = R + P - Es - D - Fs + \Delta w \quad (4)$$

Este balance hídrico del suelo suele emplearse para estimar la evapotranspiración en períodos semanales o superiores (Allen et al., 1998).

### 1.3.3. Lisimetría

Un lisímetro es un gran recipiente que encierra una determinada porción de suelo con superficie desnuda o con cubierta vegetal, ubicado en campo para representar condiciones naturales y que se utiliza para determinar la evapotranspiración de un cultivo en crecimiento, de una cubierta vegetal de referencia, o la evaporación de un suelo desnudo (Aboukhaled et al., 1986).

Al aislarse la zona del suelo en que se asientan las raíces de su entorno, tanto los flujos laterales como los de percolación o ascenso capilar son nulos. De esta forma los restantes términos del balance hídrico pueden ser determinados con precisión. En los lisímetros de pesada el incremento o pérdida de agua se mide por el cambio en la masa obtenido pesando el recipiente en el que se encuentra el suelo.

La ecuación del balance hídrico del suelo que representa las entradas y salidas de agua de un lisímetro para cada período de medida es la siguiente:

$$P + R = ET + D \pm \Delta w \quad (5)$$

La precipitación (P) y el riego (R) son medidos utilizando pluviómetros o métodos volumétricos convencionales. Al tratarse de un recipiente con paredes laterales, la escorrentía subsuperficial puede considerarse nula. Para drenar y medir el agua que percola a través de la masa de suelo (D) se utiliza una cámara de drenaje y un recipiente de volumen conocido.

Para conocer las variaciones en el contenido de agua en la masa de suelo ( $\Delta w$ ) se utilizan métodos de gravimetría, tensiómetros, etc. De esta forma el lisímetro proporciona una medida directa de la evapotranspiración en el período considerado, siendo el procedimiento que proporciona valores más precisos de ET.

### **1.3.4. Métodos numéricos de estimación de la evapotranspiración de los cultivos**

La complejidad que presentan los métodos directos de estimación de la evapotranspiración real ( $ET_{act}$ ) ha llevado al desarrollo de una metodología basada en la evapotranspiración de referencia ( $ET_{ref}$ ), utilizando parámetros climáticos y el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ).

$$ET_{act} = K_c \times K_s \times ET_{ref} \quad (6)$$

La evapotranspiración de referencia ( $ET_o$  o  $ET_r$ ) recoge las características climáticas de la zona, representando la demanda evaporativa de la atmósfera. El coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) recoge las características del cultivo en condiciones estándar, mientras que el coeficiente de estrés  $K_s$  define el efecto del estrés de los cultivos sobre la ET de los mismos ( $ET_{act}$ ). Se pueden encontrar valores típicos del coeficiente de cultivo bajo condiciones climáticas estándar en múltiples publicaciones como la de Allen et al. (1998).

Así, el modelo METRIC proporciona coeficientes de cultivo reales y específicos ( $K_{c\ act}$ ) para una determinada zona definidos como el producto de  $K_c$  por  $K_s$ , con los que podemos obtener valores de evapotranspiración real ( $ET_{act}$ ). En este trabajo se aborda, en una primera fase, la estimación de estos coeficientes de cultivo reales para la zona de estudio considerada, y en consecuencia, la determinación de la evapotranspiración real, mediante la aplicación del modelo METRIC, basado en el balance de energía con la información derivada de las imágenes del satélite Landsat 5 TM durante la campaña de riegos 2004/05.



**Área de estudio y  
recopilación de datos**

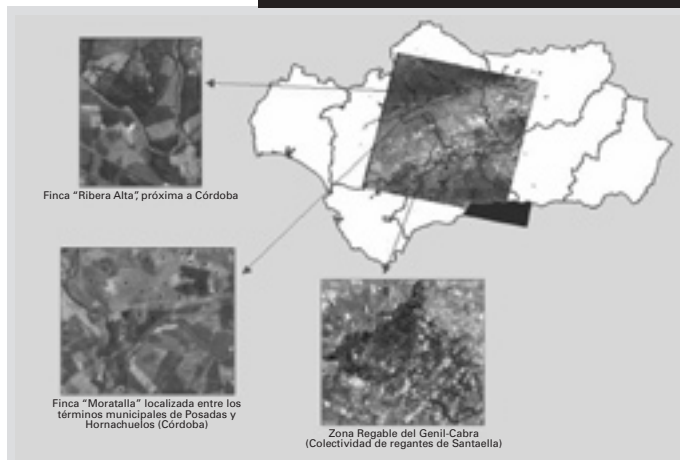
Capítulo II

## II. ÁREA DE ESTUDIO Y RECOPIACIÓN DE DATOS

Dadas las características del modelo METRIC y de la información proporcionada por el satélite Landsat 5 TM, el área de estudio abarca todo el Valle Medio del Río Guadalquivir, aproximadamente desde la ciudad de Sevilla hasta la ciudad de Jaén (gráfico II.1). Esta área constituye el ámbito de aplicación del modelo METRIC, cuyos resultados serán posteriormente validados con datos reales de campo recogidos principalmente en distintas zonas de la provincia de Córdoba, donde se centra el estudio.

GRÁFICO II.1

Área de estudio del trabajo, enmarcada en el Valle Medio del Guadalquivir, y principales zonas de la provincia de Córdoba donde se recogió información para la validación de los modelos



Fuente: Elaboración propia.

### II.1 La Zona Regable del Genil-Cabra

La Zona Regable del Genil – Cabra (Colectividad de regantes de Santaella), situada en la provincia de Córdoba ( $37^{\circ} 31' N$ ,  $4^{\circ} 51' W$ ) y con una superficie aproximada de 6990 hectáreas, constituye la base del estudio (gráfico II.2). La zona regable se sirve por un moderno sistema de distribución a la demanda que permite total flexibilidad de frecuencia, caudal y duración de riego. Aproximadamente unas 2600 ha de las zonas bajas son regadas desde una

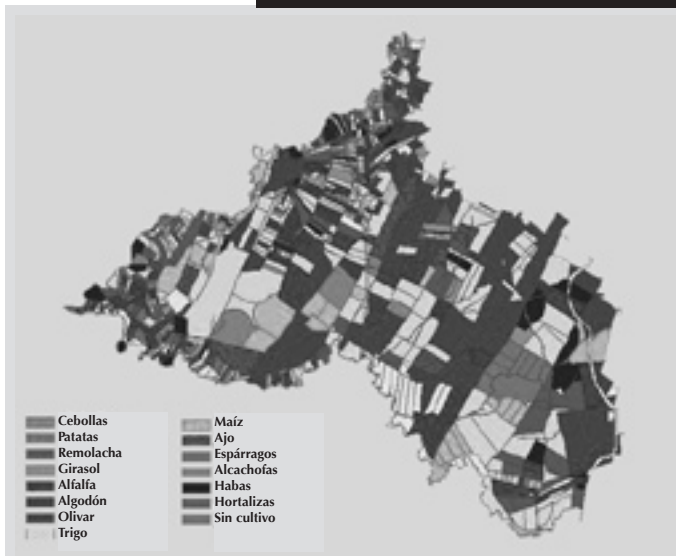
red que obtiene presión gracias a la diferencia de cota, mientras que el resto consigue la presión por medio de una central de bombeo. La zona está compuesta por aproximadamente unas 900 parcelas y el tamaño medio de las parcelas es de 8.4 ha, con más del 90% de las parcelas con una superficie inferior a 20 ha.

Los principales cultivos de la zona son cereales de invierno (27% de la superficie regada), girasol (19%), algodón (16%) y ajos (15%). Otros cultivos importantes son el olivar, remolacha, habas y cultivos hortícolas. La superficie regable está dividida en agrupaciones de riego, cada una dividida en varias parcelas. Una parcela puede estar dividida en varias subparcelas, en función de las tomas de riego que tenga, constituyendo estas últimas las unidades de manejo donde se contabiliza el volumen de agua aplicado.

Para la realización de este trabajo, se recopiló en cada parcela información relativa a tipo de cultivo (gráfico II.2), fecha de siembra, cosecha obtenida durante la campaña 2004/05, volumen de agua aplicada y sistemas de riego (gráfico II.3). La determinación de los volúmenes de riego aplicado en parcela se realizó por medio de cuatro lecturas de cada contador individual a lo largo de la campaña de riegos. Igualmente, la determinación del cultivo

GRÁFICO II.2

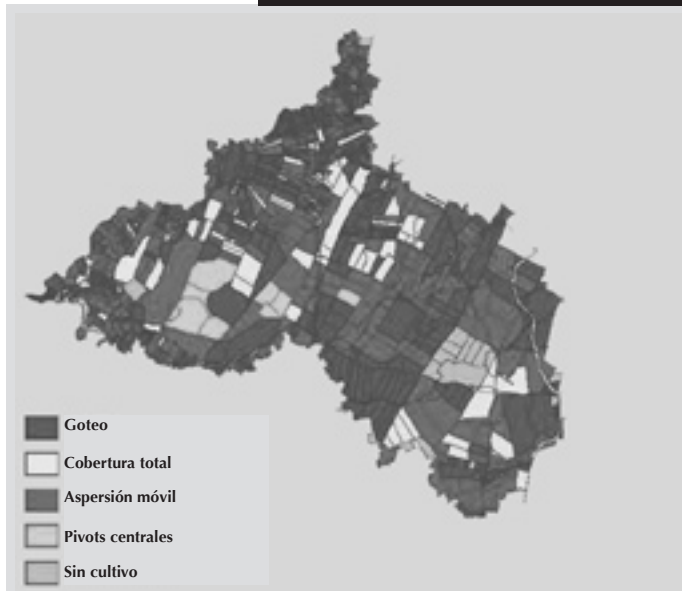
Mapa de cultivos de la Zona Regable del Genil-Cabra en la campaña 2004/05



Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO II.3

Mapa de sistemas de riego de la Zona Regable del Genil - Cabra en la campaña 2004/05



Fuente: Elaboración propia.

y sistema de riego en cada parcela se obtuvo tras una visita a cada una de las parcelas de la zona regable. Además, el Servicio de Asesoramiento al Regante (SAR) de Santaella facilitó todo tipo de datos relativos a las prácticas de manejo del riego en la zona.

## II.2 Zonas de validación y calibración de los modelos

Para realizar la validación y calibración de los modelos se ha empleado información procedente de la Zona Regable del Genil – Cabra, de la Zona Regable del Guadalquivir como la Finca Moratalla, Ribera Alta y La Veguilla, entre otras, y de diversas parcelas de remolacha en las provincias de Sevilla, Cádiz y Jaén, facilitadas por AIMCRA. En cada una de estas zonas, se obtuvo información a nivel de parcela referida a tipo cultivo, fecha de siembra, riegos aplicados y cosecha obtenida durante la campaña 2004/05.

Finalmente el número de parcelas empleadas para el proceso de calibración y validación ha sido de aproximadamente 200, número suficiente para



asegurar que el estudio contiene toda la variabilidad de la comarca. Toda la información recogida fue tratada con Sistemas de Información Geográfica (SIG), para facilitar su manejo. En el gráfico II.4 se muestra la información recogida en la finca Ribera Alta, próxima a la ciudad de Córdoba.

GRÁFICO II.4

Finca "Ribera Alta", próxima a Córdoba con información asociada a cada una de las parcelas que la componen (campaña 2004/05)





**Balance de energía  
basado en imágenes  
procedentes de  
satélite y el modelo  
METRIC**

Capítulo III

### III.

## BALANCE DE ENERGÍA BASADO EN IMÁGENES PROCEDENTES DE SATÉLITE Y EL MODELO METRIC

La evapotranspiración (ET) constituye el mayor empleo de agua con respecto al total de riego aplicado, y por este motivo su cuantificación espacial y temporal es de suma importancia para el manejo del agua en la agricultura, fundamentalmente en zonas donde este recurso es tradicionalmente limitado.

Como norma general, la estimación de la ET en trabajos relacionados con el manejo y gestión del agua a escala regional y de parcela, se ha basado en el uso del coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), como en Allen et al. (1998) o en ASCE-EWRI (2005):

$$ET_{act} = K_c \times K_s \times ET_{ref} \quad (6 \text{ bis})$$

donde  $ET_{ref}$  es la evapotranspiración de referencia (para la alfalfa,  $ET_r$ , o para pradera de festuca,  $ET_o$ ).

Sin embargo estos procedimientos proporcionan resultados excesivamente generales y no contienen las características específicas de las parcelas individuales. Esporello que, actualmente, empleando técnicas de teledetección es posible obtener una estimación precisa de la ET real, determinando su variabilidad espacial y temporal, mediante un balance de energía empleando información procedente de satélites (Anderson et al., 1997; Bastiaanssen et al., 1998; Kustas y Norman, 2000; Allen et al., 2007a).

METRIC es un modelo para la estimación de la ET real desarrollado por la Universidad de Idaho, EEUU (Allen et al, 2007a) en el año 2002. El modelo es una variante del modelo SEBAL de Bastiaanssen (Bastiaanssen et al., 1998; Bastiaanssen, 2000), el cual ha sido aplicado y validado con éxito en diferentes lugares de todo el mundo (Bastiaanssen et al., 2005).

En METRIC, la ET se determina mediante un balance de energía en la superficie empleando en nuestro caso, imágenes procedentes del satélite Landsat 5 TM. Así, la energía consumida en el proceso de la evapotranspiración se calcula como un residuo de la ecuación del balance de energía:

$$\lambda E = R_n - G - H \quad (3 \text{ bis})$$

donde  $\lambda E$  es el calor latente (energía consumida en el proceso de evapotranspiración),  $R_n$  es la radiación neta,  $G$  es flujo de calor sensible intercambiado entre la superficie y el suelo, y  $H$  es el flujo de calor sensible intercambiado entre la superficie y la atmósfera.

## III.1 Componentes del balance de energía

### 3.1.1. La Radiación Neta ( $R_n$ )

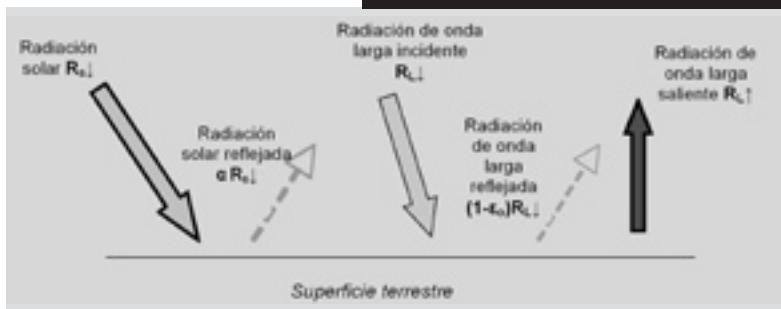
La radiación neta se calcula restando todos los flujos salientes de todos los flujos entrantes (gráfico III.1), incluyendo la radiación solar y la térmica, por medio de la siguiente ecuación:

$$R_n = R_s \downarrow - \alpha R_s \downarrow + R_L \downarrow - R_L \uparrow - (1 - \epsilon_o) R_L \downarrow \quad (7)$$

donde  $R_s$  es la radiación solar, es decir, la radiación de onda corta que llega a la superficie,  $\alpha$  es el albedo de la superficie,  $R_L \downarrow$  es la radiación de onda larga que llega a la superficie,  $R_L \uparrow$  es la radiación de onda larga que sale de la superficie, y  $\epsilon_o$  es la emisividad térmica de la superficie.

GRÁFICO III.1

Balance de radiación en la superficie terrestre



Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.2. Flujo de radiación en el suelo ( $G$ )

La magnitud del flujo de calor almacenado o liberado por el suelo es relativamente pequeña con relación al resto de flujos. Cuando se considera un ciclo temporal diario, al darse un proceso de calentamiento y enfriamiento, no se considera su contribución al balance de energía. Si se consideraran intervalos horarios o distintos a un día completo su aportación puede ser significativa, y deberían ser incluidos.

En la aplicación de METRIC para la obtención de  $G$  se utilizan las siguientes ecuaciones definidas por Tasumi (2003), que dependen de la radiación neta y del índice de vegetación LAI (*Leaf Area Index*):

$$\frac{G}{R_n} = 0.05 + 0.18 \cdot e^{-0.52 \cdot LAI} \quad \text{si } LAI \geq 0.5$$

$$\frac{G}{R_n} = 1.8 \cdot (T_s - 273.15) / R_n + 0.084 \quad \text{si } LAI < 0.5 \quad (8)$$

Igualmente, se asigna un valor constante de  $G/R_n = 0.5$  para agua y nieve. La nieve se distingue por tener una temperatura de la superficie ( $T_s$ ) inferior a 277 K, el índice de vegetación NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) inferior a cero y un elevado albedo superficial; mientras que el agua tiene NDVI menor que cero y bajo albedo.

### 3.1.3. Flujo de calor sensible (H)

El flujo de calor sensible es el debido al transporte de calor desde la superficie de la cubierta y el suelo a la atmósfera, por el mecanismo de convección, dada la diferencia de temperatura existente entre la superficie y la atmósfera. Su cálculo en METRIC se realiza mediante una función aerodinámica, basada en el gradiente de temperatura:

$$H = \rho_{air} \cdot C_p \cdot \frac{dT}{r_{ah}} \quad (9)$$

donde:

$\rho_{air}$  = densidad del aire ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$C_p$  = calor específico del aire a presión constante ( $1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )

$dT$  = diferencia de temperatura (K) entre dos alturas cercanas a la superficie,  $z_1$  y  $z_2$  (generalmente 0.1 y 2 m)

$r_{ah}$  = resistencia aerodinámica al transporte de calor ( $\text{s m}^{-1}$ )

La correcta determinación del valor de  $dT$  es esencial para la obtención de valores precisos de ET, y sobre este término se basa la calibración interna del modelo METRIC (Bastiaanssen et al., 1998). Es precisamente esta calibración la que le confiere al modelo una alta fiabilidad de los resultados obtenidos.

### 3.1.4. Flujo de calor latente ( $\lambda E$ ) y evapotranspiración (ET)

El flujo de calor latente es la cantidad de calor perdido por la superficie debido a la evapotranspiración. En METRIC este término se calcula para cada píxel como un residuo del balance de energía (Ecuación 3), siendo  $\lambda E$  un valor instantáneo para el momento en que el satélite toma la imagen ( $\text{W m}^{-2}$ ).

Para obtener un valor instantáneo de evapotranspiración, en términos de altura de agua evaporada, se divide  $\lambda E$  entre el calor latente de vaporización  $\lambda$ , que es la cantidad de energía necesaria para vaporizar la unidad de masa de agua ( $J \text{ kg}^{-1}$ ), y que depende de la temperatura.

$$ET_{ins} (mm \cdot h^{-1}) = 3600 \cdot \frac{\lambda E}{\lambda} \quad (10)$$

El coeficiente de cultivo real  $K_{c \text{ act}}$  se obtiene como la razón entre la evapotranspiración instantánea calculada y la evapotranspiración de referencia, obtenida mediante parámetros climáticos, para el momento en que se recoge la imagen:

$$K_{c \text{ act}} = \frac{ET_{ins}}{ET_o} \quad (11)$$

Para este cálculo cada píxel de la imagen tendrá un valor distinto de  $ET_{ins}$ , pero todos tendrán el mismo valor de  $ET_o$ , procedente de los datos de las estaciones climáticas utilizadas en el estudio (ver apartado 3.2.2).

Para la gestión del riego en zonas regables la evapotranspiración diaria es más útil que la horaria, por lo que en METRIC se calcula la evapotranspiración diaria asumiendo que  $K_{c \text{ act}}$  se mantiene constante durante las 24 horas del día.

Finalmente la evapotranspiración diaria ( $ET_{24}$ ) se obtiene para cada píxel de la imagen del satélite como:

$$ET_{24} (mm \cdot día^{-1}) = K_{c \text{ act}} \cdot ET_{o,24} \quad (12)$$

donde  $ET_{o,24}$  es la evapotranspiración de referencia acumulada diaria, obtenida sumando los valores de  $ET_o$  horarios para el día en que el satélite captó la imagen.

En ocasiones, para cuantificar el consumo de agua y realizar análisis de variabilidad entre parcelas, es necesario conocer la evapotranspiración estacional ( $ET_{est}$ ) en cada parcela. Su cuantificación se realiza empleando la siguiente ecuación:

$$ET_{est} = \sum_{i=m}^n K_{c \text{ act},i} \cdot ET_{o,24,i} \quad (13)$$

siendo  $ET_{est}$  (mm) la evapotranspiración acumulada en el periodo comprendido entre los días  $m$  y  $n$ ,  $K_{c \text{ act},i}$  el coeficiente de cultivo real en cada uno de los días que integran el periodo, el cual se calcula realizando una interpolación entre los valores obtenidos para cada píxel de imágenes sucesivas, y  $ET_{o,24,i}$  es la evapotranspiración de referencia acumulada ( $mm \text{ día}^{-1}$ ) para el día  $i$ .

## III.2 Aplicación del modelo METRIC en el Valle del Guadalquivir

El modelo METRIC ha sido desarrollado y aplicado originalmente en el oeste de Estados Unidos (Allen et al., 2005; 2007b), donde además se ha calibrado con técnicas lisimétricas (Tasumi et al., 2005b). Los mapas de ET obtenidos han sido usados para varios propósitos, incluidos regulaciones de derechos de agua, cuantificación del empleo de aguas subterráneas, determinación de parámetros de calidad de la gestión del riego, determinación de coeficientes de cultivo adaptados regionalmente, etc. Sin embargo, en España sólo se ha realizado una aplicación puntual (Rubio et al., 2006), donde se compararon distintos métodos para la determinación de la evapotranspiración.

Para llevar a cabo este trabajo, la versión original del modelo METRIC ha sido adaptada a las condiciones regionales del Valle del Guadalquivir, en función de la climatología y diferentes cultivos y manejo del riego de la zona. La adaptación del modelo a las condiciones del Valle del Guadalquivir ha sido supervisada por los autores del modelo, el profesor Richard G. Allen y el profesor Masahiro Tasumi.

### 3.2.1. *Procesamiento de imágenes procedentes del satélite Landsat 5 TM*

Landsat es una de las series principales de satélites operativos de observación de la tierra que ha estado en funcionamiento durante las últimas tres décadas. Con una larga serie de imágenes recopiladas y una alta resolución espacial de 30 metros en las bandas de onda corta, y de 120 y 60 metros en la banda del térmico, las imágenes del Landsat Thematic Mapper (TM) y del Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) han sido utilizadas tanto para investigación como para otros fines. La imagen Landsat proporciona información adecuada para estimar ET en aplicaciones a escala de parcela (estimación de la demanda de agua para riego, dotaciones de agua, salinidad del suelo, etc.) o a escala regional (gasto sostenible, distribución entre los diferentes usos agrícola, industrial y urbano, aplicaciones medioambientales, etc.). La frecuencia de paso es de 16 días entre las imágenes y pueden aparecer problemas en zonas lluviosas, donde es complicado obtener una imagen con el cielo despejado, condición fundamental para extraer información de la misma.

En este trabajo se han utilizado imágenes del satélite Landsat 5 TM, ya que el Landsat 7 ETM+ a pesar de presentar mejores características respecto a la resolución espacial del térmico (60 m respecto a los 120 m del Landsat 5 TM), no ha podido ser empleado por los problemas surgidos a partir de 2003 que lo imposibilitan para su uso.

Las once imágenes del Landsat 5 TM utilizadas en este estudio (cuadro III.1.) tienen como código de referencia "201/34" (path y row respectivamente) y engloban la totalidad de la provincia de Córdoba y parte de las provincias de Sevilla, Jaén y Málaga (gráfico III.2).

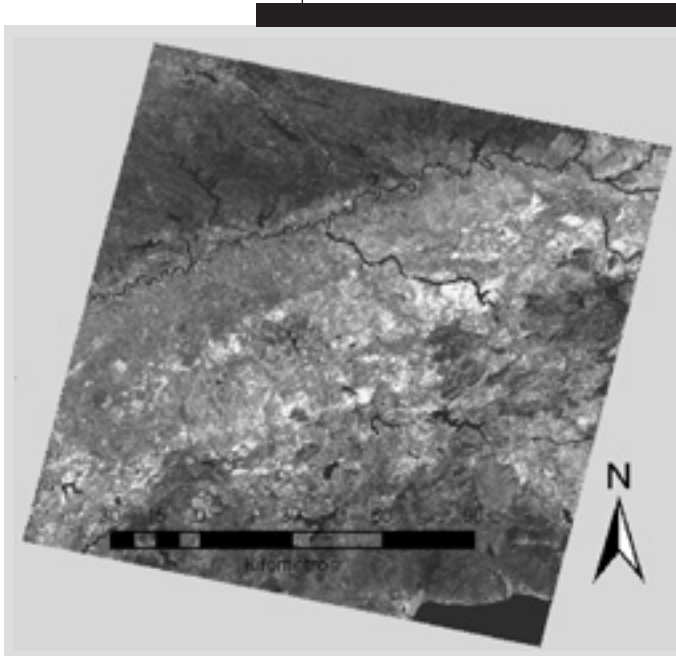
**CUADRO III.1. Imágenes del Landsat 5 utilizadas en el estudio**

IMAGEN N°	FECHA	DÍA JULIANO	HORA (GTM)
1	13-11-04	318	10:41:23
2	05-03-05	64	10:43:12
3	22-04-05	112	10:43:32
4	08-05-05	128	10:43:37
5	09-06-05	160	10:43:52
6	25-06-05	176	10:43:57
7	11-07-05	192	10:44:04
8	12-08-05	224	10:44:23
9	28-08-05	240	10:44:28
10	13-09-05	256	10:44:30
11	29-09-05	272	10:44:31

Fuente: Elaboración propia.

**GRÁFICO III.2**

**Imagen Landsat 5 TM (Path 201, Row 34) del 8 de Mayo de 2005**



Fuente: Elaboración propia.



Para su empleo en este trabajo las imágenes Landsat fueron previamente georreferenciadas mediante el procesador de imágenes ERDAS 9.0. La georreferenciación es el proceso mediante el cual se asigna a cada píxel de una imagen unas determinadas coordenadas, de acuerdo con el sistema de coordenadas que se utilice. Para ello se asignan a una serie de puntos reconocibles e inalterables en la imagen (aproximadamente unos 50 puntos) y homogéneamente distribuidos por ella, sus coordenadas obtenidas de la cartografía de referencia (Ortofotografía Digital de Andalucía, 2001-02). A partir de estos puntos de control se calcula la posición del resto mediante interpolación de polinomios de segundo grado (Richards, 1995). Una vez realizado el proceso de georreferenciación es posible considerar la imagen como un mapa, sobre el que se puede superponer cualquier cartografía que esté en el mismo sistema de referencia.

### 3.2.2. Control y validación de datos climáticos

La utilización de unos datos climáticos correctos constituye la base fundamental en el proceso de estimación de la ET con el modelo METRIC. En este estudio se han utilizado datos climáticos semi-horarios de cinco estaciones de la Red de Información Agroclimática de Andalucía (RIA; cuadro III.2. y gráfico III.3; Gavilán et al., 2006) para cada una de las fechas de las imágenes procedentes del satélite Landsat 5 TM. Estos datos han sido cuidadosamente evaluados y su calidad se ha controlado según el procedimiento estándar recomendado por ASCE-EWRI (2005).

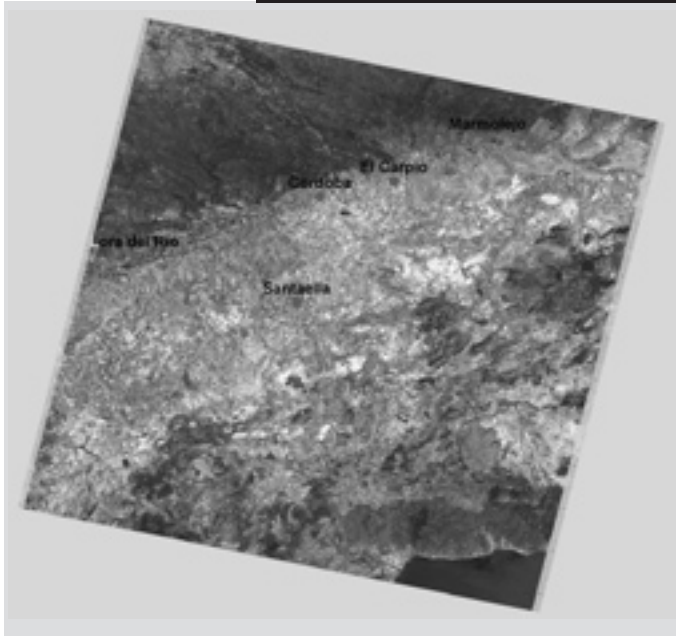
**CUADRO III.2. Localización de las estaciones utilizadas**

Nº DE ESTACIÓN	NOMBRE	PROVINCIA	LAT	LONG	ELEVACIÓN (M)
1405	El Carpio	CO	37.915	4.502	165
1406	Córdoba	CO	37.862	4.800	117
1407	Santaella	CO	37.524	4.884	207
2310	Marmolejo	JA	38.057	4.118	208
4115	Lora del Río	SE	37.660	5.539	68

Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO III.3

**Localización de las Estaciones Agroclimáticas sobre una imagen Landsat TM de la zona**



Fuente: Elaboración propia.

El cuadro III.3. recoge los valores medios de temperatura del aire ( $T_{air}$ ), humedades relativas máximas y mínimas ( $RH_{max}$  y  $RH_{min}$ ), presión de vapor de agua media diaria existente en el aire ( $e_a$ ), velocidad del viento ( $u$ ) y radiación solar ( $R_s$ ) de los años 2004 y 2005. La estación #2310 (Marmolejo) presentó la temperatura del aire más baja de todas las estaciones, debido a las noches frías desde el otoño hasta la primavera. La estación #1407 (Santaella) tiene una alta velocidad del viento y baja humedad diurna. Por otro lado las estaciones #2310 (Marmolejo) y #4115 (Lora del Río) tuvieron baja velocidad del viento y alta humedad diurna. Estas diferencias meteorológicas regionales deben ser consideradas a la hora de utilizar los datos climáticos con la imagen del satélite.

**CUADRO III.3.** Valores medios de  $T_{air}$ ,  $RH_{max}$ ,  $RH_{min}$ ,  $e_a$ ,  $u$  y  $R_s$  de los años 2004 y 2005

ESTACIÓN #	$T_{air}$ (°C)	$RH_{max}$ (%)	$RH_{min}$ (%)	$e_a$ (kPa)	$u$ (ms <sup>-1</sup> )	$R_s$ (MJ m <sup>-2</sup> )
1405	17.2	79.7	35.3	1.1	1.7	202.4
1406	17.4	80.3	35.1	1.1	1.6	209.6
1407	17.5	76.6	35.1	1.1	1.9	211.0
2310	16.4	87.1	33.6	1.1	1.4	200.5
4115	17.4	84.5	35.7	1.2	1.3	216.4

Fuente: Red de Información Agroclimática de Andalucía.

El cuadro III.4. presenta la precipitación anual de los años 2004 y 2005. El año 2005 fue bastante seco, siendo la media de las cinco estaciones de sólo 359 mm. La determinación de la precipitación es necesaria para la aplicación del modelo METRIC puesto que afecta de manera importante a los resultados, dado que para la cuantificación precisa de la evapotranspiración de los cultivos se requiere determinar la fecha de la última lluvia y cuantificar el efecto de ésta sobre el valor de la ET.

**CUADRO III.4.** Precipitación anual (mm) de los años 2004 y 2005

Año	ESTACIÓN					Media
	#1405	#1406	#1407	#2310	#4115	
2004	477	578	443	490	429	483
2005	292	410	323	362	409	359

Fuente: Red de Información Agroclimática de Andalucía.

### 3.2.3. Evapotranspiración de referencia

La evapotranspiración de referencia, tanto para la alfalfa ( $ET_r$ ) como para pradera de festuca ( $ET_o$ ), fue calculada según el procedimiento de la ecuación de ASCE Penman-Monteith (ASCE-EWRI, 2005), para cada 30 minutos. Para obtener los datos diarios se realizó una acumulación de estos valores semihorarios.

En el cuadro III.5. se presentan los valores de la evapotranspiración de referencia calculada con la ecuación de ASCE-EWRI, con los datos semihorarios. La diferencia de ET entre las distintas estaciones se debe a las características meteorológicas locales anteriormente descritas. La estación de Santaella (#1407) tuvo la mayor ET de referencia, debido a su mayor velocidad

del viento y baja humedad diurna, mientras que las estaciones de Marmolejo (#2310) y Lora del Río (#4115) tuvieron los valores menores debido a sus bajas temperaturas del aire y velocidades del viento, y a su alta humedad diurna.

**CUADRO III.5.**

**Evapotranspiración de referencia anual (mm) en 2004 y 2005, calculada con la ecuación ASCE-EWRI (2005)**

		ESTACIÓN				
Año	ET <sub>ref</sub>	#1405	#1406	#1407	#2310	#4115
2004	ET <sub>o</sub> (mm)	1269	1305	1366	1174	1289
	ET <sub>r</sub> (mm)	1608	1664	1754	1457	1602
	ET <sub>r</sub> /ET <sub>o</sub>	1.27	1.27	1.28	1.24	1.24
2005	ET <sub>o</sub> (mm)	1498	1446	1503	1357	1376
	ET <sub>r</sub> (mm)	1972	1885	1960	1747	1732
	ET <sub>r</sub> /ET <sub>o</sub>	1.32	1.30	1.30	1.29	1.26

Fuente: Elaboración propia.

Esta evapotranspiración de referencia calculada se empleará en METRIC para determinar los coeficientes de cultivo real ( $ET_{c,act}$ ), así como para realizar una calibración interna del balance de energía de la superficie y para la estimación de la ET estacional.

### **3.2.4. Recomendaciones para la utilización de los datos climáticos con la imagen satélite**

El análisis realizado concluye que los datos climáticos utilizados son de buena calidad. Las características meteorológicas locales de las cinco estaciones agroclimáticas seleccionadas son semejantes, sin embargo cada localización tiene condiciones características, como la elevada ET en Santaella (#1407) o los altos valores de precipitación de Córdoba (#1406). Las diferencias locales meteorológicas se reflejarán en la imagen satélite; de hecho, la distinta distribución de la precipitación afecta a la temperatura de la superficie obtenida mediante el satélite. Por ese motivo estas variaciones locales de las estaciones han sido tenidas en cuenta en la aplicación de METRIC, a la hora de realizar una calibración interna del balance de energía de la superficie.



**Determinación de  
necesidades de riego  
por medio del empleo  
de modelos de  
balance de agua en  
parcela**

Capítulo IV

## IV. DETERMINACIÓN DE NECESIDADES DE RIEGO POR MEDIO DEL EMPLEO DE MODELOS DE BALANCE DE AGUA EN PARCELA

El balance de agua en el suelo empleado en este trabajo está basado en el Manual FAO n° 56 (Allen et al., 1998) y fue desarrollado para la determinación de indicadores de funcionamiento en la zona regable del Genil – Cabra (Lorite et al., 2004a,b). El modelo, llamado LORMOD, se basa en el movimiento de agua en el suelo en forma de cascada, siendo las entradas del sistema la lluvia y el riego, mientras que las salidas son la transpiración del cultivo, la evaporación desde el suelo, la escorrentía superficial y la filtración profunda. Está compuesto por sub-modelos que calculan cada uno de los componentes del balance de agua y cuantifican el efecto del déficit de agua en el suelo sobre el rendimiento del cultivo. Los cálculos se realizan para cada subparcela (con un único cultivo y tipo de suelo) generando calendarios óptimos de riego y cuantificando el efecto de los calendarios reales de riego sobre los cultivos.

### IV.1 Planificación del riego

Con el modelo de balance de agua se pueden analizar diferentes estrategias de riego: una óptima, empleando los resultados del modelo de balance de agua, o una segunda empleando los resultados del modelo METRIC, generando una herramienta de suma utilidad al integrar el modelo de simulación LORMOD con técnicas de teledetección.

A la hora de planificar el riego es necesario anticipar la aplicación del mismo si se quieren evitar los efectos del estrés sobre el cultivo, dado que la absorción de agua por un cultivo se reduce antes de que se alcance el punto de marchitez permanente. El valor umbral de humedad del suelo por debajo del cual el cultivo comienza a sufrir estrés (conocido como nivel de agotamiento permisible), depende del cultivo y ha sido obtenido para diferentes cultivos en Allen et al. (1998) y adaptado en este trabajo a las condiciones locales.

Así en la estrategia óptima, el riego es aplicado en el momento adecuado para evitar que el cultivo sufra estrés y con la cantidad necesaria para que no se produzcan pérdidas de agua por filtración profunda. Adicionalmente se han considerado prácticas de riego comunes en la zona, como el recorte del riego al final del ciclo del cultivo (en el caso del algodón) o la aplicación de un primer riego anterior a la siembra (en el caso del ajo, maíz, remolacha y otros cultivos menos frecuentes). Para generar este calendario, se usa el modelo de simulación descrito previamente, considerando las condiciones

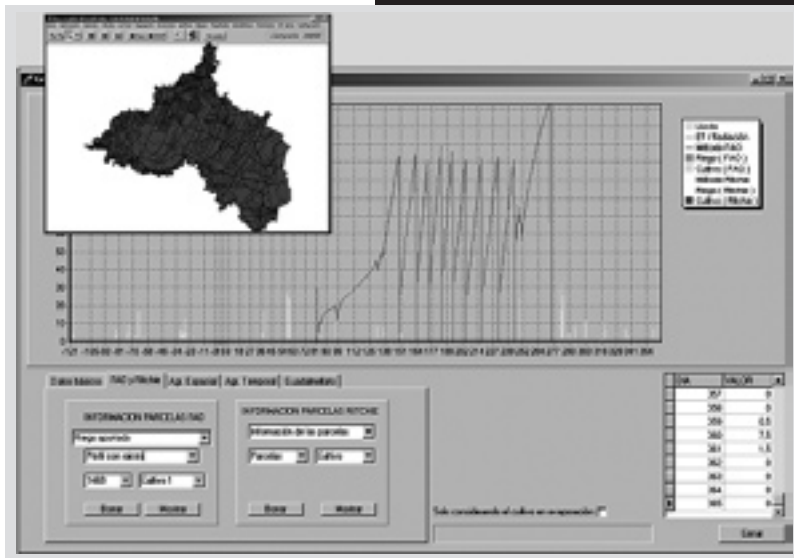
específicas de cada parcela (cultivo, fecha de siembra, propiedades del suelo, pendiente) y las condiciones climáticas (lluvia y evapotranspiración).

Para la planificación del riego por medio de la integración del modelo de simulación LORMOD con técnicas de teledetección, el balance de agua original es modificado para incluir los valores de coeficiente de cultivo real específicos para cada parcela, proporcionados por el modelo METRIC. La metodología de integración se detalla en el siguiente apartado.

En el gráfico IV.1. se muestra la evolución del balance de agua (por medio del déficit de agua en el suelo) y el calendario de riegos llevado a cabo por el agricultor en la parcela 1469 (algodón con riego por aspersión móvil), dentro de la Zona Regable del Genil – Cabra (Colectividad de Santaella) durante la campaña de riegos 2004/05 empleando el modelo de balance de agua descrito anteriormente.

GRÁFICO IV.1

Calendario de riegos realizado por el agricultor y evolución del déficit de agua en el suelo para la parcela 1469 cultivada con algodón con riego por aspersión móvil durante la campaña 2004/05



Fuente: El aboración propia.

## IV.2 Integración de METRIC y el balance de agua en el suelo

Tradicionalmente para la generación de calendarios de riego se han utilizado valores de coeficiente de cultivo basados en información general como el Manual de Riegos de la FAO n° 56 (Allen et al., 1998). Estas publicaciones proporcionan valores medios que no tienen por qué corresponderse a las condiciones locales / regionales donde se encuentra el cultivo. Este es sin duda el gran problema del empleo de modelos de simulación para la determinación de calendarios de riego, al no tener en cuenta las condiciones específicas de cada parcela, pudiendo generar problemas de déficit hídrico o encharcamiento en determinadas parcelas.

Gracias a las técnicas de teledetección y al uso de modelos de balance de energía se pueden obtener valores muy precisos de los coeficientes de cultivo en cada parcela. Sin embargo, el gran inconveniente de las técnicas de teledetección es la deficiente resolución temporal, es decir, el intervalo entre imágenes disponibles (16 días en el mejor de los casos) que hace que la programación de riegos no se pueda realizar de manera precisa.

La integración de la información proporcionada por METRIC con un modelo de balance de agua como el que se presenta en este trabajo (gráfico IV.2.), proporciona una herramienta de suma utilidad dado que cada parcela cuenta con un calendario de riegos específico, con información de la parcela y con una escala diaria, suficiente para realizar un calendario de riegos correcto.

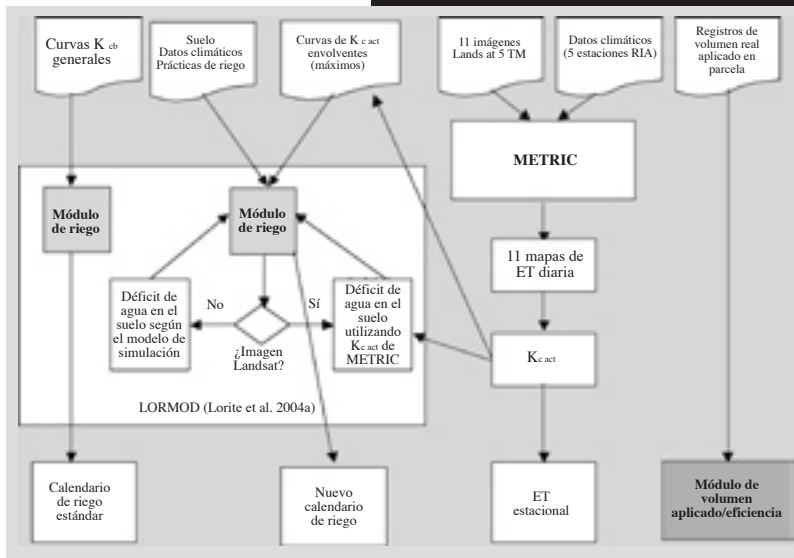
Así, el modelo de balance de agua original LORMOD fue modificado para incluir los nuevos valores de  $K_{c_{act}}$  para cada parcela objeto de estudio, en lugar de los valores genéricos obtenidos del Manual FAO n° 56 (Allen et al., 1998). Esta actualización se realiza cada 16 días, coincidiendo con las fechas de las imágenes del satélite Landsat TM (Cuadro 3.1.), y así, de este modo durante la campaña de riegos 2004/05 el déficit de agua en el suelo de cada parcela fue corregido en once fechas (Cuadro 3.1.), al emplear los nuevos coeficientes de cultivo reales proporcionados por METRIC.

Gracias a esta corrección, el calendario de riegos se adapta a todas las características específicas del cultivo: fecha de siembra, recorte de caudal a final de campaña, etc. aportándose el riego en el momento más conveniente y lográndose un ahorro de agua. Adicionalmente, al poseer una herramienta totalmente adaptada a la zona objeto de estudio se puede extender a parcelas de reducido tamaño en las cuales la utilización de técnicas de teledetección se hace inviable.



GRÁFICO IV.2

Esquema que describe la integración del modelo LORMOD con las estimaciones de ET proporcionadas por METRIC



Fuente: Elaboración propia.



**Integración del  
modelo METRIC y  
del modelo de  
balance de agua  
LORMOD**

Capítulo V

## V. INTEGRACIÓN DEL MODELO METRIC Y DEL MODELO DE BALANCE DE AGUA LORMOD

### V.1 Resultados de la aplicación de METRIC en el Valle del Guadalquivir

#### 5.1.1. Estimación de la ET

El modelo METRIC ha sido aplicado a las once imágenes Landsat TM de la zona disponibles durante la campaña 2004/05, tal y como se ha indicado en anteriores apartados. Los resultados de su primera aplicación completa en España muestran una excelente estimación de la ET espacial y temporal según la validación llevada a cabo en diversas parcelas del Valle del Guadalquivir (ver Capítulo 2).

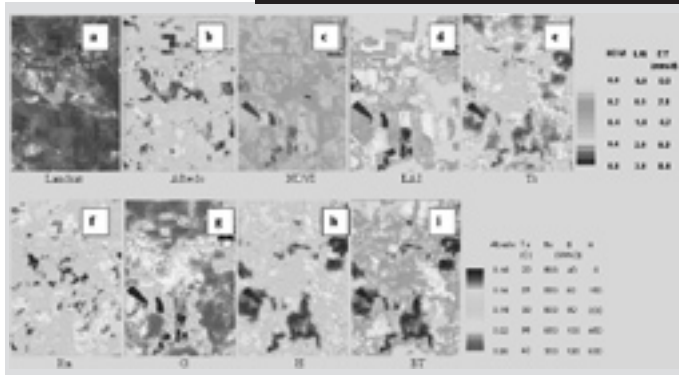
El gráfico V.1 muestra en imágenes los resultados de la aplicación del balance de energía obtenidos paso a paso con el modelo METRIC (albedo, NDVI, LAI, temperatura de la superficie, radiación neta, G, H y finalmente ET), en una área de la Zona Regable del Genil – Cabra, en la Colectividad de Santaella, a partir de una imagen Landsat TM del 8 de Mayo de 2005 (gráfico V.1-a).

Cada una de las imágenes proporcionadas por Landsat 5 TM tiene información de seis bandas de onda corta (del visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio) y una banda de onda larga (la del térmico). El albedo de la superficie (gráfico V.1-b) se calcula usando las seis bandas de onda corta y la radiación solar para cada píxel, obtenida a partir de la pendiente y la orientación de la superficie. En zonas agrícolas con suelo desnudo el albedo es generalmente alto, mientras que es bajo en zonas oscuras (o húmedas) de suelo desnudo, y moderado en superficies con vegetación.

Los índices de vegetación NDVI y LAI (gráfico V.1-c y d) se han calculado a partir de las bandas 3 y 4 (bandas del rojo y del infrarrojo). La temperatura de la superficie (gráfico V.1-e) se obtiene fundamentalmente a partir de la banda del térmico. La banda del térmico está relacionada con la humedad del suelo, y por lo tanto con la ET. Finalmente, combinando cada uno de los términos del balance de energía (gráfico V.1-f-g-h), se determina el valor de la evapotranspiración real de los cultivos (gráfico V.1-i).

GRÁFICO V.1

Balance de energía calculado con METRIC (zona regable del Genil - Cabra, 8 mayo, 2005)



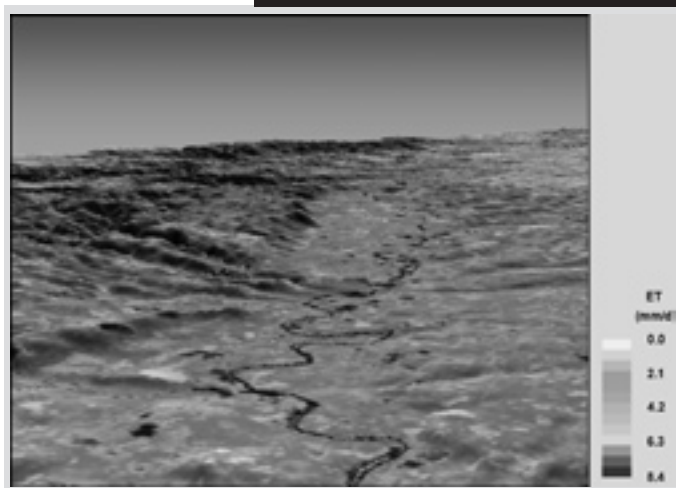
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede comprobar en el gráfico V.2., la superficie incluida en una imagen del satélite Landsat 5 TM es muy grande (aproximadamente 180 kilómetros de lado), lo que permite realizar, con una única ejecución del modelo, estudios a nivel de cuenca. Así, en el gráfico V.2. se muestra un mapa de evapotranspiración real en tres dimensiones de la cuenca del Guadalquivir, para cuya obtención se ha utilizado un Modelo Digital de Elevaciones. Empleando esta información, la realización de análisis espaciales se convierte en una tarea fácil y permite de una forma didáctica ilustrar la variabilidad en el manejo del riego y enseñar a los agricultores las posibilidades que las nuevas tecnologías proporcionan para la realización de calendarios de riego precisos y adaptados a las condiciones locales de cada explotación.

En el gráfico V.2. se muestran claramente las zonas de secano de la campiña cordobesa con una baja evapotranspiración, y las zonas regables en el curso del Río Guadalquivir con altas tasas de evapotranspiración (tonos de gris más oscuros).

GRÁFICO V.2

Mapa de ET en 3-D obtenido con METRIC del Valle del Guadalquivir (área próxima a la ciudad de Córdoba) a partir de una imagen del satélite Landsat TM del 8 de mayo de 2005



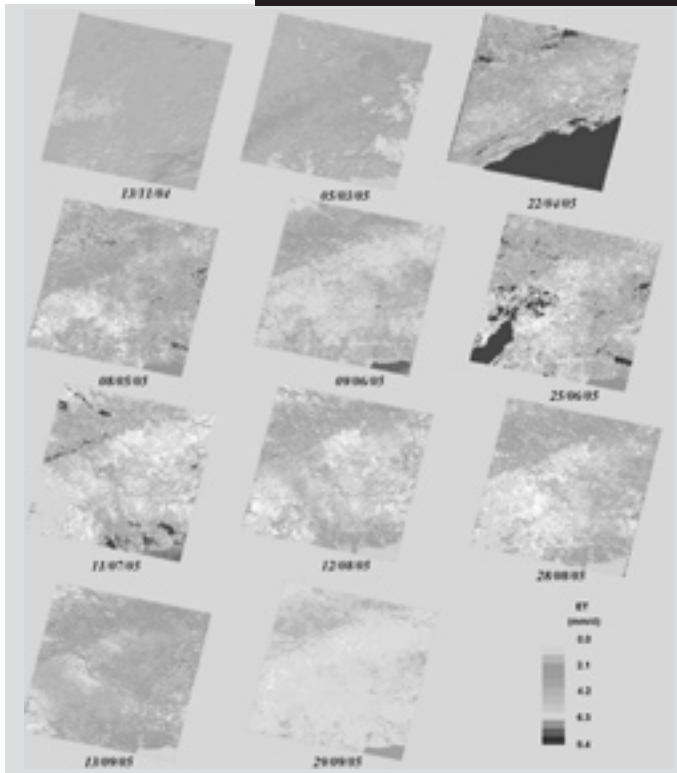
Fuente: Elaboración propia.

El gráfico V.3 recoge los mapas de evapotranspiración diaria ( $ET_{24}$ , mm día<sup>-1</sup>) de las once imágenes del Landsat 5 TM que componen este estudio. En dichos mapas se puede contemplar la evolución de los cultivos a lo largo de la campaña 2004/05. Se han eliminado de las imágenes las áreas cubiertas con nubes (áreas en negro), debido a que el balance de energía proporcionaría en esas zonas resultados erróneos.

Igualmente, en el gráfico V.3. se puede determinar la evolución del estado de la vegetación a través de la evapotranspiración real diaria, obteniéndose valores muy bajos al final del verano (cuando los riegos ya han finalizado y el suelo está seco) y valores relativamente altos en Abril y Mayo por las lluvias ocurridas durante la primavera y los riegos aplicados.

GRÁFICO V.3

Mapas de evapotranspiración real diaria ( $\text{mm día}^{-1}$ ), correspondientes a la aplicación del modelo METRIC a las once imágenes disponibles del satélite Landsat 5 TM



Fuente: Elaboración propia.

### 5.1.2. Curvas de coeficiente de cultivo real y análisis de su variabilidad en la Zona Regable del Genil - Cabra

A partir de la evapotranspiración real de los cultivos obtenida con METRIC (ver gráfico V.3) y empleando información procedente de la RIA (ver apartado 3.3.2) se determinó el coeficiente de cultivo real ( $K_{c\text{ act}}$ ) para cada una de las imágenes, permitiendo conocer sus curvas de evolución a lo largo de la campaña de riegos, y su variabilidad entre las distintas parcelas. Estas curvas de  $K_{c\text{ act}}$  muestran las diferentes fases en que se divide el ciclo

de crecimiento de los cultivos, y son imprescindibles para la realización de calendarios de riego. Dado que únicamente se disponen de once valores de  $K_{c_{act}}$  a lo largo de la campaña, se ha procedido a realizar una interpolación entre los valores puntuales obtenidos por METRIC para obtener las curvas mostradas en el gráfico V.4.

El gráfico V.4 representa las curvas del coeficiente de cultivo real de dos cultivos típicos de verano (algodón; gráfico V.4-a y maíz; gráfico V.4-b) y de dos cultivos de invierno/primavera (remolacha; gráfico V.4-c y ajo; gráfico V.4-d), en la Zona Regable del Genil - Cabra. Sobre cada figura se ha representado con una línea gruesa (FAO 56) la curva del coeficiente de cultivo estándar de Allen et al (1998).

Los coeficientes de cultivo reales obtenidos con METRIC para cada parcela de la zona mostraron una alta variabilidad en todos los cultivos analizados. A la variabilidad asociada a la cantidad de riego aplicada y a prácticas de manejo del cultivo (como en el caso del algodón), se añade la variabilidad causada por diferentes fechas de siembra (como en el maíz) y por diferentes fechas de recolección (como en la remolacha y el ajo) y se puede comprobar en el gráfico V.4. La variabilidad en el manejo de riego ya fue analizada por Lorite et al. (2004b) en términos de variación de volumen de agua aportado a cada parcela, y corrobora los resultados aquí obtenidos.

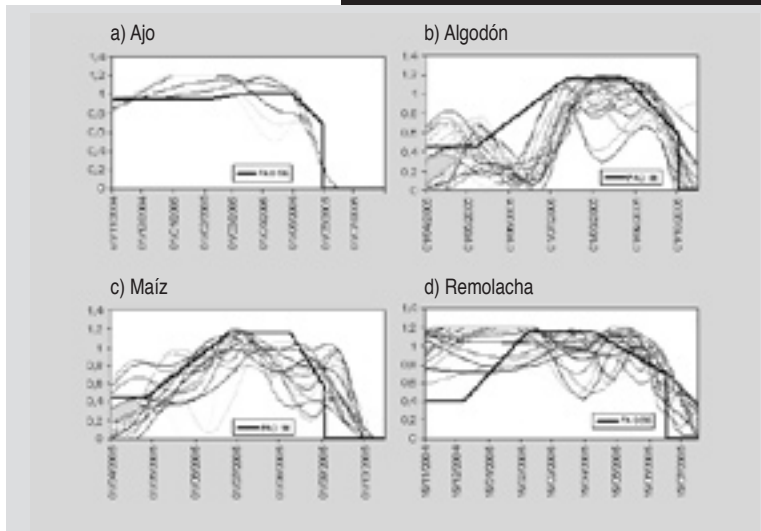
Tradicionalmente en la Zona Regable del Genil – Cabra el algodón se riega con aspersión móvil (incluso en parcelas equipadas por riego por goteo) en la primera etapa del cultivo (Abril-Mayo), para asegurar la germinación. Por este motivo sus valores de  $K_{c_{act}}$  iniciales fueron altos después de su siembra y después disminuyeron al terminar las aplicaciones con aspersión (inicio de Junio) y comenzar el riego por goteo (gráfico V.4.a).

En la remolacha y el ajo, los valores de  $K_{c_{act}}$  fueron altos en el periodo de invierno (Noviembre a Marzo). Esto fue consecuencia del invierno seco, que provocó la necesidad de aplicar riegos ligeros pero frecuentes. Como se puede comprobar en el gráfico V.4 el ciclo de cultivo de la remolacha fue extraordinariamente largo, debido a la necesidad de volver a plantar tras las heladas ocurridas durante el invierno de 2005. La longitud de la estación causó un aumento en la ET de la remolacha (gráfico V.5.) y en las necesidades de riego. De hecho, el riego para remolacha fue más alto que para maíz y algodón durante la campaña 2004/05.

Como ya se indicó anteriormente, realizando una interpolación entre los valores del coeficiente de cultivo real obtenidos para cada píxel, se obtienen las curvas de coeficiente de cultivo real a lo largo de todo el

GRÁFICO V.4

Curvas de coeficiente de cultivo real para parcelas con algodón (a), maíz (b), remolacha (c) y ajo (d), en la Zona Regable del Genil - Cabra



La línea gruesa (FAO 56) indica los valores del coeficiente de cultivo estándar de Allen et al. (1998)  
Fuente: Elaboración propia.

ciclo del cultivo. Este cálculo permite, junto con la evapotranspiración de referencia de cada día, obtener la evapotranspiración estacional ( $ET_{est}$ ) para ese periodo, mediante la Ecuación 13.

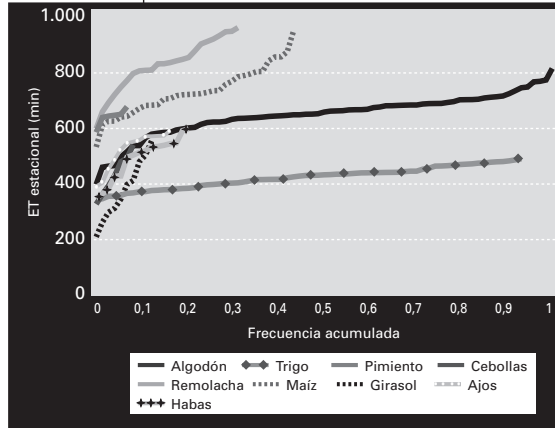
En el gráfico V.5 se representan las curvas de frecuencia acumulada de los valores de  $ET$  estacional de los principales cultivos de la Zona Regable del Genil – Cabra durante la campaña 2004/05. Se constata la alta variabilidad en términos de  $ET$  en la zona, lo que implica una incorrecta gestión del riego y por lo tanto se requiere una mejora de la gestión del riego por medio de los Servicios de Asesoramiento al Regante presentes en la zona, incidiendo en aquellos agricultores en cuyas parcelas se percibe una peor gestión del riego.

Los gráficos V.6. y V.7 muestran, respectivamente, el mapa de evapotranspiración estacional de la imagen completa y, para su observación más detallada, el mapa de evapotranspiración estacional de la Zona Regable del Genil – Cabra (Colectividad de Santaella), para el periodo comprendido entre los meses de Marzo a Septiembre de 2005. Se



GRÁFICO V.5

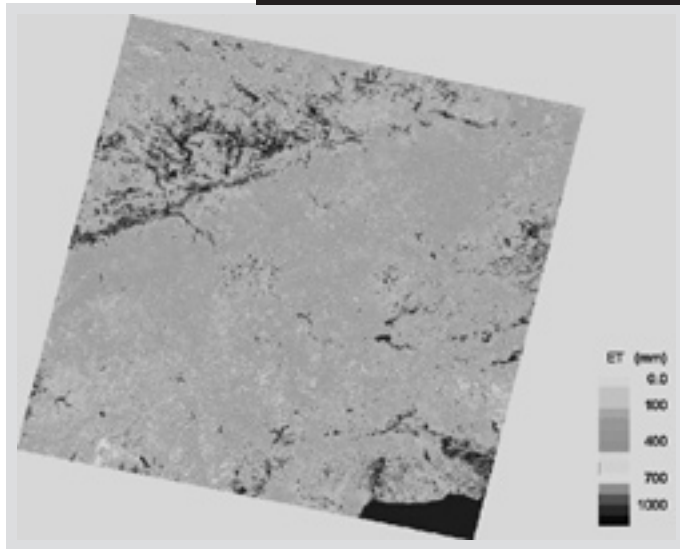
Curvas de frecuencia acumulada de los valores de ET estacional en la Zona Regable de Genil-Cabra para los cultivos más representativos



Fuente: AEAT y elaboración propia.

GRÁFICO V.6

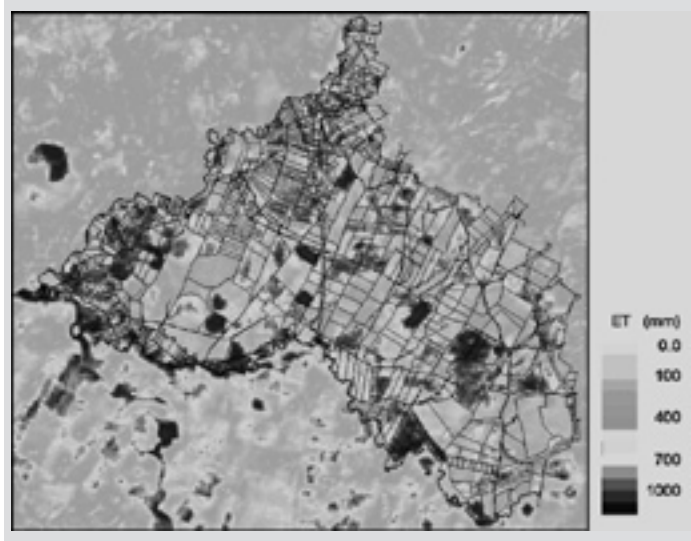
Mapa de evapotranspiración estacional durante los meses de marzo a septiembre de 2005



Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO V.7

Evapotranspiración estacional en la Zona Regable del Genil - Cabra (Colectividad de Santaella, correspondiente a los meses de marzo a septiembre de 2005)



Fuente: Elaboración propia.

observa que la evapotranspiración estacional estuvo comprendida entre los 1000 mm en parcelas bien regadas hasta valores cercanos a cero en zonas no agrícolas.

En el gráfico V.7. se comprueba la alta variabilidad en el manejo del riego causada por la gran variabilidad de cultivos (ver gráfico II.2), pero también debida a la gran variabilidad existente en el manejo del riego dentro de la zona (Lorite et al., 2004b). Igualmente se comprueba como al norte de la zona regable existe una zona de secano, con valores de evapotranspiración estacional cercanos a 200 mm, y al sur se encuentra otra zona regable con valores similares a los encontrados en la Zona Regable del Genil - Cabra (Colectividad de Santaella).

## Resultados de la integración de METRIC y el modelo de balance de agua en la Zona Regable del Genil – Cabra

### 5.2.1. Generación de calendarios de riego

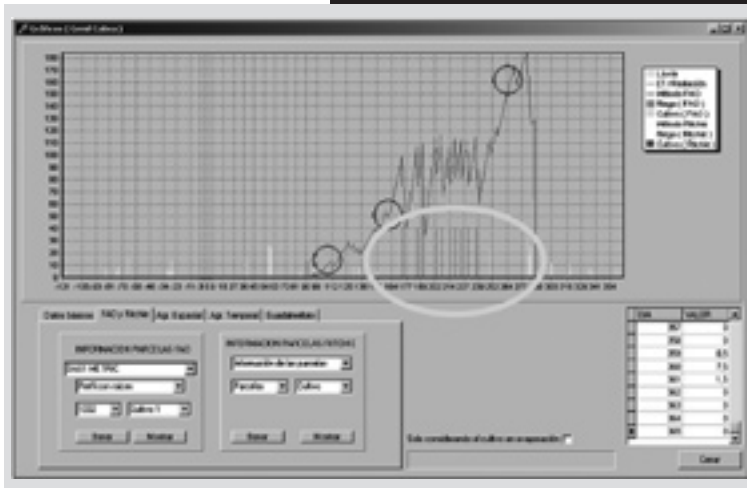
La integración de la información proporcionada por METRIC con un modelo de balance de agua como LORMOD ha permitido realizar un calendario de riegos específico para cada parcela que considera todas las características propias del desarrollo del cultivo, lo que permite determinar la cantidad de riego óptima en el momento más conveniente.

El modelo de balance de agua original fue modificado para incluir los nuevos valores de coeficiente de cultivo real en cada parcela objeto de estudio, en lugar de los valores genéricos obtenidos del Manual FAO nº 56 (Allen et al., 1998). Esta actualización de los parámetros del modelo se realiza cada 16 días, coincidiendo con las fechas de las imágenes del satélite Landsat TM.

A modo de ejemplo, las figuras siguientes muestran la evolución del déficit de agua en el suelo en la parcela 1057-A2, dentro de la Zona Regable del Genil - Cabra. El gráfico V.7. representa el calendario de riegos óptimo integrando la información del modelo METRIC en el modelo de balance de agua LORMOD. Se puede comprobar por las caídas que se producen en la curva no asociadas a la aplicación de riego ni lluvia (marcadas con un círculo negro en el gráfico V.8. en los días julianos 112, 160 y 172), que el déficit de agua en el suelo se corrige cada 16 días (en los días julianos 48, 64, 112, 128, 160, 176, 192, 208, 240, 256 y 272). En los días 176 y 192 estas correcciones del balance de agua coinciden con el riego. Estas correcciones en la cantidad de agua en el suelo hacen que el calendario generado se adapte perfectamente a las condiciones reales de la parcela analizada, ocurriendo diferencias muy significativas entre los calendarios tradicionales y los desarrollados con esta metodología de integración.

GRÁFICO V.7

**Evolución del déficit de agua en el suelo en la parcela 1057-A2 con un calendario de riegos óptimo integrando la información del modelo METRIC en el modelo de balance de agua LORMOD**

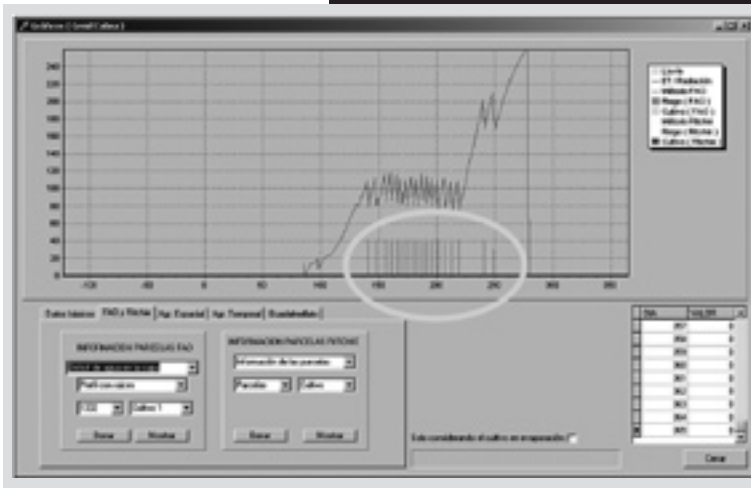


Fuente: Elaboración propia.

El gráfico V.8. muestra el calendario de riegos óptimo en la misma parcela anterior empleando la metodología tradicional con coeficientes de cultivo medios procedentes de Allen et al. (1998). Se puede comprobar como la cantidad de riego aplicada con la nueva metodología propuesta es significativamente menor que en el segundo caso, por lo que se generaría sobrierriego si se aplicara este calendario óptimo según los coeficientes de cultivo tradicionales. Los riegos propuestos están marcados en un círculo en los gráficos V.7. y V.8.

GRÁFICO V.8

Evolución del déficit de agua en el suelo en la parcela 1057-A2 con un calendario de riegos óptimos empleando los coeficientes de cultivo procedentes de Allen et al (1998).



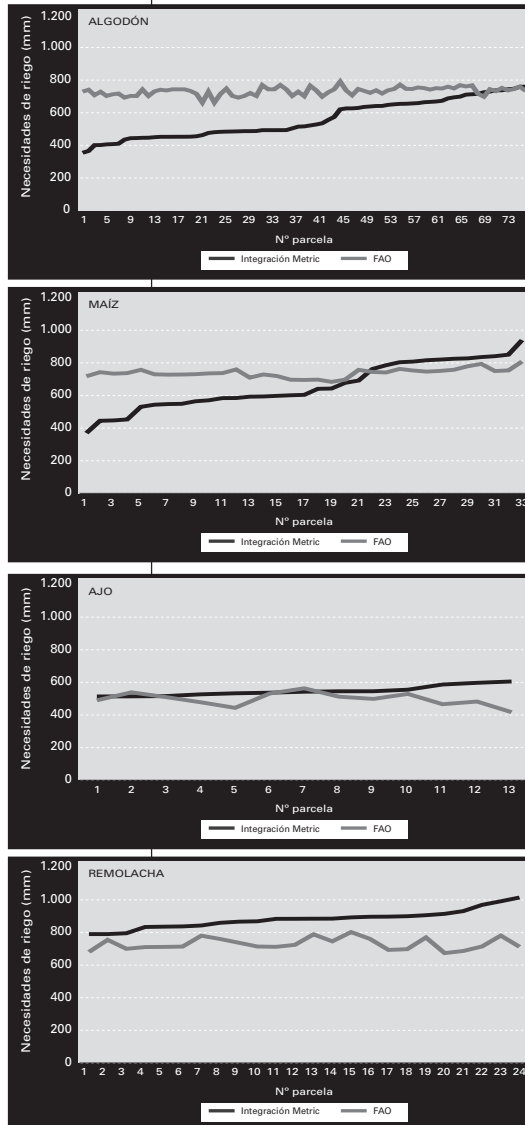
Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico V.9. se comparan las recomendaciones de riego realizadas con la metodología tradicional y con la nueva metodología de integración propuesta para los cultivos más frecuentes de la zona. Así, se encontraron diferencias significativas en muchas parcelas de la zona, especialmente en los cultivos de maíz, algodón y remolacha. Así, la consideración de las curvas de coeficiente de cultivo real, afectadas por circunstancias adversas (estrés, enfermedades, etc.), provocó un significativo ahorro de agua en cultivos como el algodón y el maíz (alrededor del 20% en el algodón y 10% en el maíz; gráfico V.9 y cuadro V.1). En estos casos el crecimiento del cultivo en algunas parcelas no fue el óptimo, y por lo tanto las necesidades de riego de esa parcela fueron menores.

Sin embargo, en otros cultivos como el ajo y la remolacha, la integración mostró que requerían más agua de la recomendada por el calendario estándar (un 10% en ajo y un 21% en remolacha; gráfico V.9 y cuadro V.1), incremento que supondría un aumento en el rendimiento de estos cultivos al reducir el estrés generado por la estrategia de riego tradicional sin corrección por técnicas de teledetección.

GRÁFICO V.9

Necesidades de riego calculadas usando la integración de METRIC con el modelo de simulación LORMOD, comparados con la metodología tradicional de FAO, para los principales cultivos de la Zona Regable de Genil - Cabra, durante la campaña 2004/05



Fuente: Elaboración propia.

**CUADRO V.1**

**Riego medio recomendado y coeficiente de variación (entre paréntesis) determinado por la integración de METRIC con LORMOD y utilizando la metodología tradicional de FAO (Allen et al., 1998)**

CULTIVO	NÚMERO DE PARCELAS	METRIC (mm)	FAO (mm)
Algodón	75	560 (0.21)	733 (0.04)
Maíz	33	663 (0.22)	738 (0.04)
Ajo	13	548 (0.05)	497 (0.08)
Remolacha	24	882 (0.06)	730 (0.05)

Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.2. Estimación de la eficiencia de riego

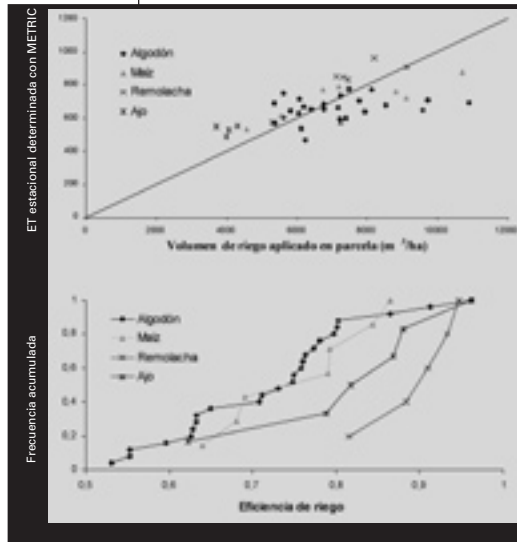
Al disponer de medidas reales de volumen de agua empleado por el agricultor en cada parcela (Lorite et al., 2004a), es posible estimar la eficiencia de riego en la zona, utilizando la ET obtenida con el modelo METRIC y conociendo la lluvia efectiva (gráfico V.10 y cuadro V.2).

Así, la eficiencia media en parcela de la zona se estimó en 0.77, lo cual puede ser considerado como un valor adecuado, cifrándose en un 23% las pérdidas por escorrentía o percolación profunda. Haciendo distinción entre los distintos métodos de riego, se comprobó que los sistemas de aspersión presentaban menor eficiencia media que los sistemas de goteo (0.71 frente a 0.75 en algodón, ó 0.70 frente a 0.80 en maíz; cuadro V.2).

En el gráfico V.10. se puede comprobar que determinadas parcelas cuentan con una eficiencia especialmente baja (valores próximos e inferiores a 0.6). Entre las causas de estos bajos valores se encuentra el tipo de suelos de la zona (arcillosos) que junto con una topografía ondulada hace que se produzca escorrentía si el manejo del riego no es correcto, aunque el sistema de riego sea por goteo. Igualmente, cuando en la parcela se realiza un riego en exceso, la eficiencia de ese riego se reduce significativamente dado que una gran parte de ese riego se pierde en forma de percolación profunda o escorrentía.

GRÁFICO V.10

a) Relación entre la ET estacional con METRIC y el volumen de riego medido en cada parcela. b) Curvas de frecuencia acumulada de la eficiencia de riego estimada para los principales cultivos durante la campaña 2004/05 en la Zona Regable de Genil - Cabra



Fuente: Elaboración propia.

CUADRO V.2

Valores medios de eficiencia de riego en parcela estimados con METRIC. Entre paréntesis se indica el coeficiente de variación.

CULTIVO	GLOBAL	ASPERSIÓN	GOTEO
Algodón	0.72 (0.15)	0.71 (0.17)	0.75 (0.09)
Maíz	0.76 (0.11)	0.70 (0.09)	0.80 (0.08)
Ajo	0.82 (0.13)	0.82 (0.13)	—
Remolacha	0.90 (0.05)	0.90 (0.05)	—
Media	0.77 (0.15)	0.75 (0.17)	0.77 (0.09)

Fuente: Elaboración propia.



Con esta metodología la estimación de la eficiencia del riego en parcela se puede obtener de un modo rápido y preciso, evitando el laborioso sistema de estimación en campo y pudiéndose realizar análisis a escala de zona regable o regional.

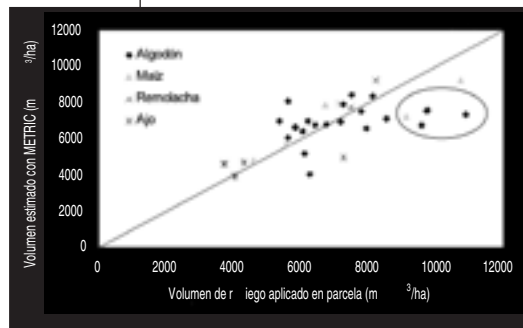
Una segunda aplicación del modelo METRIC fue la estimación del volumen de riego aplicado por el agricultor a nivel de parcela. Esta tarea es de suma utilidad a los gerentes de zonas regables y gestores de cuenca con la cual pueden identificar riegos no autorizados y determinar si el volumen aplicado por los agricultores es el adecuado o no, especialmente en zonas regables sin contadores en parcela.

Para estimar este volumen de agua de cada parcela utilizando METRIC, es preciso determinar la eficiencia del riego en la zona por lo que se tomó al azar una muestra del 20% del total de parcelas con registros de volumen de agua aplicado y datos de ET proporcionados por METRIC. De esta forma se determinó un valor global de eficiencia de la zona, que sirvió para calcular el volumen de agua aplicado en el resto de las parcelas.

Una vez obtenida la eficiencia media de la zona, junto con el valor de ET estimado por METRIC se determinó el volumen de agua aplicado en cada una de las parcelas de la zona regable. En el gráfico V.11 se recoge la validación de los resultados obtenidos al comparar los volúmenes de agua estimados con los valores medidos en parcela con contadores.

GRÁFICO V.11

**Comparación entre el volumen de riego estimado con METRIC y el volumen real registrado en parcela. En naranja línea 1:1. En el círculo se indican las parcelas con riego excesivo**



Fuen te : Elaboración propia.

De forma general, se encontró que las estimaciones de volumen basadas en este procedimiento eran precisas, al compararlas con los registros reales medidos con los equipos de medida en parcela. Así, mientras que el valor medio de las medidas reales fue de  $6.990 \text{ m}^3/\text{ha}$ , el valor del volumen estimado con METRIC fue  $6.770 \text{ m}^3/\text{ha}$ , implicando un error del 3%.

Realizando este análisis parcela por parcela, en más del 60% de las parcelas la metodología desarrollada en este trabajo generó una estimación precisa del volumen de agua aplicado, permitiendo además identificar aquellas parcelas en las que se estaba regando en exceso (parcelas marcadas con un círculo en el gráfico V.11.).

Como se puede comprobar en el gráfico V.11., muchas parcelas aparecen sobre la línea 1:1, lo que demuestra que la aproximación es adecuada para estimar el volumen de agua aplicado en una parcela, siempre que se disponga de un valor correcto de eficiencia. Las parcelas que están por debajo de dicha línea representan parcelas donde existe un exceso de riego aplicado, o bien donde la eficiencia real es menor que el valor medio considerado, lo cual implica que existe la necesidad de mejorar la gestión del riego (bien aplicando menos agua o mejorando la eficiencia del sistema de riego). El caso de los puntos situados por encima de la línea se debe a que la eficiencia real de esas parcelas es mayor que la eficiencia media estimada.

Con la metodología descrita en este capítulo la gestión de los recursos a nivel de zona regable se ve mejorada de forma muy significativa, al determinar de manera muy precisa dos de las principales incertidumbres a la hora de la gestión del riego en una zona regable: la eficiencia de la aplicación del riego en parcela y el volumen de agua real aplicado por los agricultores.



## **Conclusiones**

Capítulo VI

## VI. CONCLUSIONES

El modelo METRIC ha demostrado su utilidad para determinar la evapotranspiración real de los cultivos, incluso en condiciones totalmente diferentes a las encontradas en su zona de origen, como son las existentes en la Zona Regable del Genil - Cabra, en el Valle del Guadalquivir.

Con este modelo se ha podido estudiar a nivel de parcela la evolución de los cultivos a lo largo de todo su ciclo. La determinación de mapas de evapotranspiración real en grandes zonas regables facilita la identificación de un gran número de factores, como el déficit hídrico puntual originado por una mala gestión del riego, enfermedades, encharcamiento, falta de uniformidad o cualquier otra circunstancia que afecte al cultivo en su crecimiento y desarrollo. En general, estos efectos que son difíciles de detectar con otros métodos y sólo son percibidos cuando el daño sobre el cultivo ya se ha producido y tiene difícil corrección. Por ejemplo, en la Zona Regable del Genil - Cabra, las heladas ocurridas durante el invierno de la campaña 2004/2005 obligaron a resembrar casi la totalidad de las parcelas de remolacha, lo que supuso un incremento de ET debido al aumento en la duración de su ciclo. Si en este cultivo se hubiera empleado la metodología tradicional, los calendarios de riego hubieran generado importantes déficits que hubieran afectado de manera importante a la cosecha del cultivo.

Sin embargo, pese a las evidentes ventajas del empleo de técnicas de teledetección, su uso exclusivo genera serios inconvenientes para la programación de riegos debido a su deficiente escala temporal (16 días en el caso del satélite Landsat 5 TM), por lo que se hace necesario desarrollar herramientas que permitan realizar el seguimiento del calendario de riegos entre los periodos sin imágenes. En este trabajo se ha empleado un modelo de balance de agua que permite realizar este seguimiento del cultivo y del contenido de agua en el suelo a escala diaria, corregido con la información procedente del modelo METRIC. Además, la utilización de modelos de balance de agua permite el uso de estas herramientas en parcelas con reducido tamaño, las cuales no son posibles de evaluar con el empleo de imágenes del satélite Landsat TM.

La integración del modelo METRIC con modelos de simulación basados en el balance de agua, permite ajustar calendarios de riego a medida que la estación va avanzando, comenzando con un calendario indicativo basado en valores medios (Lorite et al., 2004a), que se va corrigiendo con información real de los cultivos a medida que se dispone de imágenes procedentes de satélite.

En el caso de la Zona Regable del Genil - Cabra, esta integración supuso un ahorro de un 23% en el riego medio del algodón y un aumento del 21%

para el caso de la remolacha, debido a las circunstancias anteriormente descritas. Estas diferencias están relacionadas con la precisión de los valores de coeficientes de cultivo reales proporcionados por METRIC, que recogen las características específicas que pueden afectar a las necesidades de agua de un cultivo, y que no son consideradas con la metodología tradicional.

La estimación de la eficiencia de riego en parcela utilizando resultados procedentes de METRIC y registros de volumen de riego, supone un gran avance dada la dificultad que normalmente conlleva la estimación de este parámetro empleando sólo datos de campo. En el área de estudio se comprobó que los sistemas de riego por aspersión presentaban menor eficiencia que los de goteo (Cuadro 5.2). Lo mismo ocurría con los cultivos de invierno (ajo y remolacha), cuya eficiencia de riego era mayor que los de verano (algodón y maíz), debido a la aplicación de riegos más ligeros (alrededor de 40 mm) y el mayor control ejercido sobre su riego (en el caso de la remolacha, promovido por la industria azucarera con la instalación de modernos sistemas de riego).

La obtención de estimaciones de volumen de agua aplicado a partir de la eficiencia media de riego en parcela media y los resultados proporcionados por METRIC, constituye una herramienta muy eficaz para cuantificar y mejorar el manejo del riego a escala de parcela. Además esta metodología permite controlar el volumen de agua aplicado por el agricultor en épocas de suministro restringido, o la cantidad de agua subterránea extraída a través de pozos para riego.

Finalmente, la metodología descrita en este trabajo puede constituirse como una herramienta de gran utilidad para mejorar la labor realizada por los Servicios de Asesoramiento al Regante, especialmente en épocas de sequía, pudiendo identificar a regantes con una baja eficiencia de aplicación del riego en parcela y dar así recomendaciones más precisas y específicas.

Con todas las medidas de mejora del riego recogidas en este trabajo se conseguiría un uso más eficiente de los recursos hídricos, permitiendo la sostenibilidad de los regadíos andaluces en una situación como la actual en la que otros sectores compiten duramente por los recursos hídricos disponibles.



# **Bibliografía**

Capítulo VII

## Bibliografía

- Aboukhaled, A.; Alfaro, J.F.; Smith, M., 1986. Los lisímetros. Estudios FAO, Serie Riego y Drenaje, nº 39. FAO, Roma.
- 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.
- Allen, R.G.; Tasumi, M.; Morse, A.; Trezza, R., 2005. A Landsat-based Energy Balance and Evapotranspiration Model in Western US Water Rights Regulation and Planning. Irrigation and Drainage Systems, 19: 251-268.
- Allen, R.G.; Tasumi, M.; Trezza, R., 2007a. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)- Model. Journal of Irrigation and Drainage. Engineering, ASCE 133 (4): 380-394
- Allen, R.G.; Tasumi, M.; Morse, A.; Trezza, R.; Wright, J.L.; Bastiaanssen, W.; Kramber, W.; Lorite, I.; Robison, C., 2007b. Satellite- based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Applications. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE 133 (4): 395-406.
- Anderson, M. C.; Norman, J. M.; Diak, G. R.; Kustas, W. P.; Mecikalski, J. R., 1997. A Two-Source Time-Integrated Model for Estimating Surface Fluxes Using Thermal Infrared Remote Sensing. Remote Sensing of Environment, 60: 195-216.
- ASCE-EWRI, 2005. The ASCE Standardized reference evapotranspiration equation. Environmental and water resources institute of the ASCE standardization of reference evapotranspiration task committee. American Society of Civil Engineers, Reston, p. 216
- Bastiaanssen, W.G.M.; Menenti, M.; Feddes, R.A.; Holtslag, A.A.M., 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. Journal of Hydrology, 212-213:198-212.
- Bastiaanssen, W.G.M., 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. Journal of Hydrology, 229:87-100.
- Bastiaanssen, W.G.M.; Noordman, E.J.M.; Pelgrum, H.; Davids, G.; Thoreson, B.P.; Allen, R.G., 2005. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 131(1): 85-93.
- Doorenbos, J.; Pruitt, W.O., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 24, Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, 179p.

- Gavilán, P.; Lorite, I.J.;  
Tornero, S.; Berengena, J.,  
2006. Regional calibration of Hargreaves equation for  
estimating reference ET in a semiarid environment.  
*Agricultural Water Management*, 81: 257-281.
- Hillel, D.; Warrick, A.W.;  
Baker, R.S.; Rosenzweig, C.,  
1998. Environmental soil physics. Academic Press,  
San Diego.
- Kustas, W.P.;  
Norman, J.M., 2000. A Two-Source Energy Balance Approach Using  
Directional Radiometric Temperature Observations  
for Sparse Canopy Covered Surfaces. *Agronomy  
Journal*, 92:847-854.
- Lorite, I.J.; Mateos, L.;  
Feres, E., 2004a. Evaluating irrigation performance in a  
Mediterranean environment. I. Model and general  
assessment of an irrigation scheme. *Irrigation  
Science*, 23: 77-84.
- Lorite, I.J.; Mateos, L.;  
Feres, E., 2004b. Evaluating irrigation performance in a  
Mediterranean environment. II. Variability  
among crops and farmers. *Irrigation Science*, 23:  
85-92.
- MIMAM.1998. El libro blanco del agua en España. Ministerio de  
Medio Ambiente. Madrid
- Richards, J.A., 1995. Remote Sensing Digital Image Analysis. Cambridge,  
New York. Cambridge University Press, 499p.
- Rosenberg, N.J.; Blad, B.L.;  
Verma, S.B., 1983. Microclimate: the biological environment. Wiley,  
New York.
- Rubio, E.; Colina, J.;  
D'Urso, G.; Trezza, R.;  
Allen, R.; Calera, A.;  
González, J.; Jochum, A.;  
Kelly, C.; Menenti, M.;  
Tasumi, M.; Vuolo, F., 2006. A case study on estimation of ET at Barrax, Spain  
with intercomparison of methods. Proceedings  
of EGU General Assembly 2006, Viena, Austria,  
April 4, 2006.
- Tasumi, M., 2003. Progress in operational estimation of regional  
evapotranspiration using satellite imagery. Ph.D.  
Dissertation, University of Idaho, Moscow, ID,  
357p.
- Tasumi, M.; Trezza, R.;  
Allen, R.G.; Wright, J.L.,  
2005b. Operational aspects of satellite-based energy  
balance models for irrigated crops in the semi-  
arid U.S. *Irrigation and Drainage Systems*,  
19: 355-376.