

APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN Y SIG A LA DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE MAPAS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

J. Reca¹, J.L. Medina², E. Camacho², R. López³ y J. Roldán²

RESUMEN: La estimación de la evapotranspiración es esencial en los sistemas de riego, en el cálculo de pérdidas de agua en embalses, en la estimación de balances hídricos, en las predicciones de escorrentía, así como en estudios climatológicos y meteorológicos. Las nuevas técnicas denominadas teledetección y sistemas de información geográfica (SIG) permiten el cálculo de la distribución espacial de este parámetro. Un nuevo modelo racional, SEBAL (Bastiaanssen, 1995), basado en la ecuación de conservación de la energía, ha sido aplicado en el estudio que se presenta. En este modelo se ha reducido el número de relaciones empíricas, además de presentar otras ventajas. El modelo ha sido calibrado y validado en una zona localizada en el Valle del Guadalquivir (España), a partir de una imagen del satélite Landsat-TM5 y de información climática. Posteriormente, el modelo ha sido utilizado con una resolución menor que la original por medio de un procedimiento de agregación de la imagen TM original. Este cambio en la resolución fue adoptado al objeto de comprobar la posible utilización de otras clases de imagen de satélite (por ejemplo, el NOAA). La evapotranspiración y otras variables obtenidas por teledetección se relacionan con ciertas características superficiales, por medio del uso de mapas de cultivos, suelos y mapas digitales de elevación del área de estudio.

INTRODUCCIÓN

La gestión del agua tiene una importancia creciente en el sur de la península Ibérica, donde los cultivos regados tienen una alta influencia en la economía. La sequía ocurrida en los primeros años de la década de los noventa provocó que muchas de estas zonas no se regasen. La estimación más exacta de las demandas de agua de los cultivos, el momento de riego y una mejora en la aplicación nos permitirá un uso más eficiente de los recursos hídricos.

Para estimar el volumen de riego, es necesario realizar un balance de agua en el suelo. La evapotranspiración (ET) es uno de los términos de este balance. Los sensores remotos pueden proporcionar estimaciones de la humedad del suelo y de la evapotranspiración (Price, 1980). Las imágenes Landsat-TM5 tienen una buena resolución espacial (30x30 m) para ser usada en una escala relativamente grande. Sin embargo, la resolución temporal de estas imágenes (16 días) no permite una programación de riegos.

En este estudio se ha determinado la ET con una imagen Landsat-TM5. Más tarde la imagen original ha sido agregada para comprobar el comportamiento del modelo en la resolución de las imágenes NOAA-AVHRR.

La variación espacial de los parámetros determinados con los sensores remotos, está relacionada con aspectos geográficos. La vegetación, tipo de suelo y topografía tienen influencia en estos parámetros.

OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo han sido generar mapas de evapotranspiración, temperatura y de los flujos superficiales de energía para la zona del Término Municipal de Aguilar de la Frontera (Córdoba), usando la información proporcionada por la imagen del Satélite Landsat y algunos datos adicionales de campo, mediante la aplicación del modelo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) (Bastiaanssen, 1995).

Contrastar los datos espaciales obtenidos con los datos de evapotranspiración puntuales calculados según los métodos de cálculo de la ET tradicionales.

Estudiar la incidencia de la resolución espacial de las imágenes en los resultados del modelo.

Estudiar experimentalmente la influencia de ciertos parámetros superficiales como el tipo de cubierta vegetal, la orientación del terreno y el tipo de suelo sobre la evapotranspiración, el albedo y la temperatura superficial, mediante la utilización conjunta de SIG y de la Teledetección.

¹ Departamento de Ingeniería Rural. Universidad de Almería.

² Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba. email: aglcapoe@uco.es email: jroldan@lucano.uco.es

³ Departamento de Física. Universidad de Córdoba.



Figura 1. Localización del área de estudio

METODOLOGÍA

Área de estudio

Como área de estudio se eligió el término municipal de Aguilar de la Frontera porque se disponía de una gran cantidad de datos de esta zona, fruto de anteriores estudios (Camacho, 1991). Por otra parte, la existencia de áreas regadas y no regadas y de masas de agua (lagunas y embalses), permitirá el contraste de la evapotranspiración, necesaria para calibrar el modelo.

Aguilar de la Frontera está localizada en el sudeste de la provincia de Córdoba (Figura 1). La extensión de su término municipal es de 16760 ha. El cultivo más importante en la zona es el olivo. El clima es mediterráneo templado-cálido con veranos secos e inviernos suaves, según la clasificación climática de Köppen.



Figura 2. Estaciones meteorológicas en el área

Materiales

Datos climáticos

Se utilizaron como parte de los datos de entrada al modelo SEBAL y para el posterior contraste de resultados. Los datos diarios necesarios fueron: temperaturas máximas y mínimas, presión de vapor, velocidad del viento, precipitación y radiación incidente. Estos datos se obtuvieron de las ocho estaciones meteorológicas más próximas al término (Figura 2).

Imagen Landsat-TM5 y cartografía

Para realizar el estudio se dispuso de una imagen Landsat-TM5, del día 2 de julio de 1990 y de la siguiente información cartográfica adicional:

- Mapa de cultivos de Aguilar de la Frontera (1:10000)
- Mapa de suelos de Aguilar de la Frontera (1:10000)
- Mapa topográfico de Andalucía del Instituto Cartográfico de Andalucía (Provincia de Córdoba; 1:10000)

Los dos primeros mapas fueron elaborados por Camacho (1991).

Programación

Tanto el modelo SEBAL como la demás programación necesaria están escritas en lenguaje Fortran. Además es necesario el uso de programas comerciales de tratamiento digital de imágenes (Erdas), así como de paquetes SIG: Ilwis (Ilwis, 1993) y Arc/Info (ESRI, 1990).

El algoritmo SEBAL

El algoritmo SEBAL, resuelve el balance de energía celda a celda a partir de las imágenes de satélite y de algunos datos adicionales de campo. El balance de radiación se obtiene a partir de la cantidad de radiación incidente en la superficie terrestre menos la emitida por la misma. La radiación neta, R_n , (ecuación 1) supone el aporte energético total que se invierte en tres procesos: flujo de calor en el suelo (G_o), flujo de calor sensible (H) y flujo de calor latente (λE). El algoritmo SEBAL obtiene el valor del flujo de calor latente como término residual de la ecuación 1, estimando previamente para cada celda de la imagen los valores de R_n , G_o y H sucesivamente.

$$R_n = G_o + H + \lambda E \quad (1)$$

La radiación neta es calculada a partir de los valores de reflectividad espectral y de la temperatura radiante superficial observados por el satélite, así como de los valores de radiación solar en la parte superior de la atmósfera función de la posición del punto y del momento de toma de la imagen. El balance de radiación de onda larga se considera constante para toda la superficie. La imagen Landsat solo dispone de un canal térmico, por lo que resulta más impreciso la corrección de los efectos de emisividad y atmosféricos para obtener la temperatura superficial.

El flujo de calor en el suelo se obtiene a partir de una relación empírica en función de la radiación neta y del índice de vegetación obtenido a partir de las reflectividades observadas en el espectro rojo y del infrarrojo.

El flujo de calor sensible se obtiene mediante un procedimiento iterativo que parte de la estimación del flujo efectivo de cantidad de movimiento obtenido a partir de la resistencia aerodinámica para zonas secas y húmedas de la imagen, usando la pendiente de la recta de regresión entre la temperatura superficial (T_0) y la reflectividad superficial (r_0). La diferencia de temperaturas superficial y del aire se relaciona linealmente con la temperatura superficial. Este ajuste lineal se realiza calculando la diferencia entre la temperatura superficial y del aire mediante la ecuación de flujo de calor sensible en las dos condiciones extremas mencionadas: una zona húmeda donde se puede considerar que el flujo de calor sensible es nulo y otra seca donde se considera que la evaporación es nula. La existencia de estas zonas en la imagen es imprescindible para que pueda llevarse a cabo el ajuste. Su determinación en la imagen se realiza a partir de los valores del índice de vegetación y de la relación entre la temperatura superficial y la reflectividad $T_0(r_0)$. Se ha demostrado que esta relación es creciente para zonas húmedas y decreciente para zonas secas (Menenti y col. 1989, Bastiaanssen y Menenti. 1989, Reza y col. 1996). Los flujos de cantidad de movimiento y de calor son calculados a partir de las resistencias aerodinámicas estimadas usando las relaciones derivadas del perfil aerodinámico suponiendo un esquema de resistencias monocapa. Una vez calculado el valor de H , el flujo de calor latente se obtiene como el residuo pixel a pixel de este balance de flujos de energía.

En la *Figura 3* se representa de forma esquemática el proceso de determinación del mapa de flujo de calor latente a partir de la información proporcionada por la imagen Landsat-TM5 (Medina y col. 1996).

Agregación a la resolución espacial NOAA -AVHRR

La imagen original se sometió a un proceso de agregación de forma que la resolución final fuese igual a la de las imágenes proporcionadas por los satélites NOAA-AVHRR. Con esto se persigue conocer la respuesta del modelo a la variación en la resolución espacial, que servirá como punto de partida para la aplicación de este algoritmo a este tipo de imágenes que tienen la ventaja de su mayor resolución temporal.

Este proceso de agregación se efectuó calculando la media de grupos de 1369 píxeles (123 ha) de la imagen inicial, y creando una nueva imagen con píxeles de este tamaño con un valor único igual a la media de todos los píxeles originales incluidos en él. El proceso de agregación tuvo lugar en las 7 bandas de la imagen Landsat-TM5.

Análisis con otros parámetros superficiales

Para entender el proceso de ET es necesario estudiar la influencia de diversos parámetros territoriales sobre la misma. De entre estos parámetros territoriales, se ha considerado que el tipo de suelo, el tipo de cubierta vegetal (tipo de cultivo) así como la orientación del terreno son algunas de las variables superficiales que condicionan los flujos de energía. De igual modo, resulta conveniente no solamente analizar la influencia de estos parámetros sobre la ET, sino también sobre otras variables derivadas de la imagen que intervienen de forma directa en el balance de energía como la temperatura superficial y albedo. Utilizando las herramientas propias de un SIG, es posible realizar este análisis y establecer de forma empírica las relaciones entre los mismos.

El proceso de análisis consistió en discriminar los suelos desnudos de los suelos con cobertura vegetal, lo cual

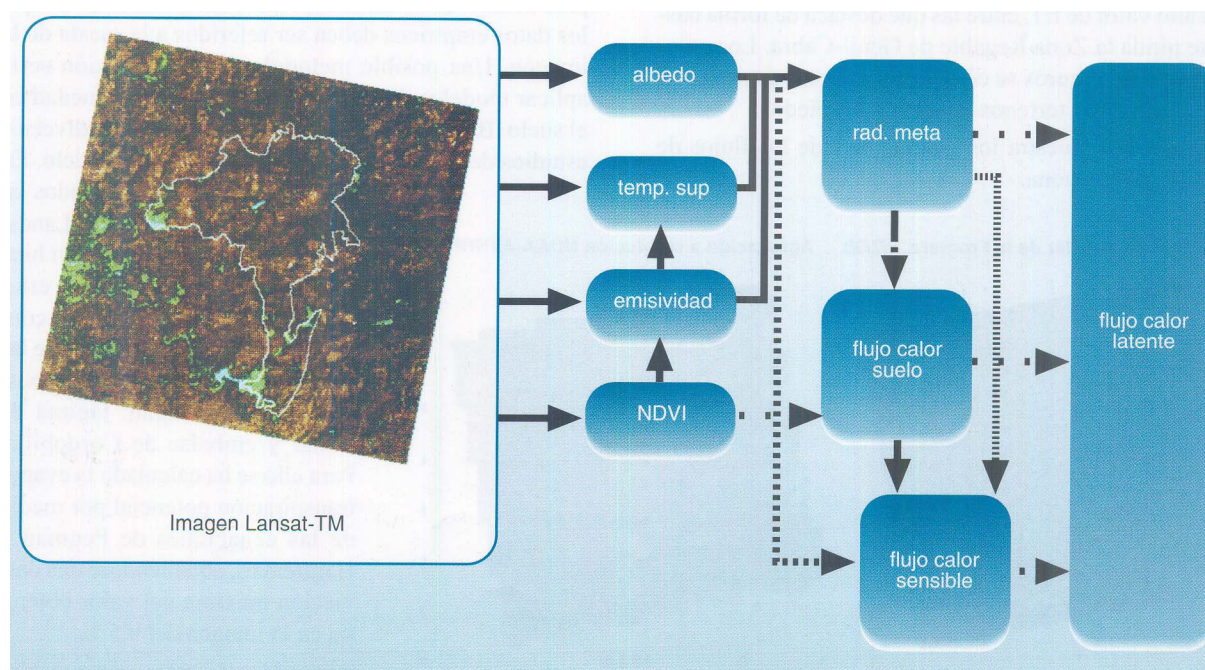


Figura 3. Representación esquemática del algoritmo SEBAL

se realizó mediante el albedo superficial y el índice de velación (NDVI). Una vez obtenidos los mapas de ET, temperatura superficial, y albedo tanto para suelos desnudos como vegetados, se cruzaron los mapas referidos a suelos desnudos con el mapa de tipos de suelo y los referidos a suelos vegetados con el mapa de tipos de cultivos. De esta forma se dispusieron de mapas de las variables analizadas para cada una de las clases de suelos y cultivos que se consideraron. Para estudiar la influencia de la orientación del terreno se generó un mapa de orientación a partir de un modelo digital del terreno obtenido mediante la digitalización de las curvas altimétricas. Posteriormente, y siguiendo un proceso similar al descrito se realizó el cruce entre dicho mapa de orientaciones y los de ET, temperatura y albedo (Medina 1996, Medina y col. 1998)

RESULTADOS

Evapotranspiración

El procesamiento digital de la imagen del satélite proporcionó como resultado las imágenes de temperatura superficial, albedo e índice de vegetación de la zona de estudio. Mediante la aplicación del algoritmo SEBAL se obtuvieron mapas de flujos de calor latente, sensible y de calor en el suelo y finalmente mapas de la fracción evaporativa y de evapotranspiración diaria.

En la *Figura 5*, se muestra el mapa de evaporación diaria para la zona. En línea blanca se aprecia el límite del término municipal de Aguilar de la Frontera. Los valores altos de evaporación aparecen en color azul en la imagen y se corresponden con las masas de agua como el embalse de Cordobilla y la laguna de Zóñar. Debido a la menor resolución de la imagen agregada, la zona azul central correspondiente a la laguna de Zóñar desaparece. El color verde de la figura muestra también zonas con alto valor de ET, entre las que destaca de forma bastante nítida la Zona Regable de Genil-Cabra. Los colores pardos y oscuros se corresponden con bajos valores de ET como los terrenos de secano y viñedo.

La *Figura 6*, muestra los histogramas de los flujos de energía para la zona.

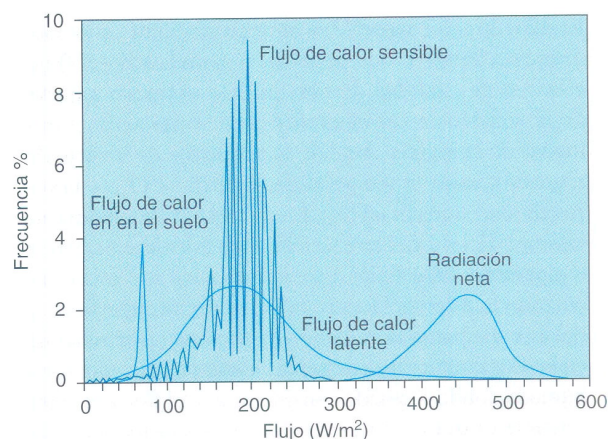


Figura 6. Flujos de calor

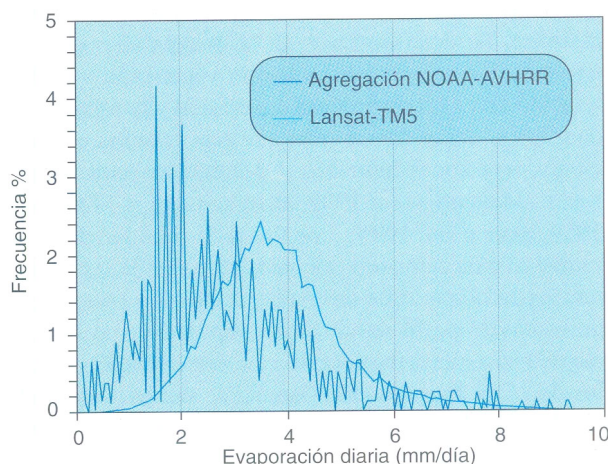


Figura 7. Histogramas de Evapotranspiración

La calibración y validación de los resultados de evapotranspiración obtenidos es relativamente complicada, por cuanto no existen datos medidos de evapotranspiración para el área de estudio. Otro problema adicional es que los datos empíricos deben ser referidos a la escala de la imagen. Una posible metodología de validación sería aplicar modelos distribuidos de balance de humedad en el suelo. Baastianssen (1995) ha llevado a cabo diversos estudios de campo para calibrar y validar el modelo. En

nuestro trabajo, los resultados en resolución espacial original Landsat (figuras 5a y 7), se ajustan bien a las condiciones del área de estudio, aunque éstos solo se han contrastado con la evaporación de las dos grandes masas de agua existentes en la imagen, laguna de Zóñar y embalse de Cordobilla. Para ello se ha calculado la evapotranspiración potencial por medio de las ecuaciones de Penman y Hargreaves, obteniéndose una desviación máxima del valor obtenido en la imagen del 9.5 %.

Al realizar la agregación a resolución NOAA-AVHRR (Figuras 5b y 7), los valores de media, moda y

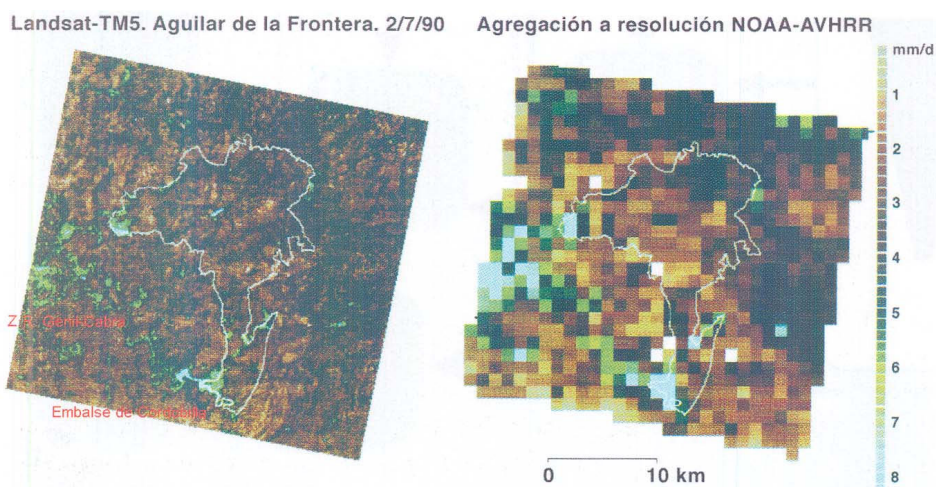


Figura 5. Mapas de evapotranspiración diaria en resolución Landsat y NOAA

mediana se mantienen, disminuyendo la desviación estándar, en todos los parámetros. No fue posible, sin embargo, realizar un buen ajuste del flujo de calor sensible a esta resolución debido a que la calibración necesaria para asignar a los píxeles secos un flujo de calor latente igual a cero y a los píxeles donde se encuentran masas de agua o suelos muy húmedos un valor de flujo de calor sensible igual a cero, no pudo ser tan exacta como en resolución original ya que ahora se trabaja con valores medios.

La evapotranspiración calculada a esta resolución espacial mayor los valores máximos y minora los valores mínimos obtenidos a resolución original Landsat-TM5, incrementándose la desviación típica de la distribución de frecuencias. La media sin embargo, se mantiene. Sería aconsejable calibrar la relación lineal entre la temperatura superficial y la diferencia de temperatura suelo-aire a esta escala, además de trabajar con áreas más extensas (imágenes completas) (Roerink, 1994), dependiendo la precisión de los resultados de la heterogeneidad de la zona de estudio.

Orientaciones

El mapa de orientaciones se obtuvo partiendo del modelo digital del terreno, previa digitalización e interpolación de las curvas de nivel. Las orientaciones fueron clasificadas en 8 clases. Los resultados obtenidos al analizar conjuntamente el mapa de orientaciones con el de albedo, temperatura (Figura 8) y ET indican una mayor temperatura y un albedo inferior en las laderas que miran al sureste, debido a la posición del sol a estas horas de la mañana. Se observa una mayor ET media en las laderas norte, aunque estas diferencias son pequeñas.

En la Figura 8 se observa el desplazamiento relativo que tienen los histogramas de temperatura debido a la orientación. Se recomienda, por tanto, incluir la variable orientación en un análisis local del balance de energía.

Cultivos

Existen 5 cultivos mayoritarios en la zona: herbáceo seco, herbáceo riego, olivar (regado y no) y viñedo.

En la Figura 9, se observan los histogramas de ET, para cultivos de riego y de seco. Conviene resaltar que el valor medio de ET es mucho mayor en cultivos regados que en aquellos de seco, pero además se observa una mayor variabilidad de los valores de ET en el primer caso, lo cual se refleja en el valor más alto de la desviación típica. Este hecho se debe fundamentalmente a que la tasa de ET será función del estado hídrico y de desarrollo del cultivo. Así, en cultivos de regadío existirá mayor variabilidad en función de la fecha y la cantidad de agua de riego suministrada. Esto no ocurre en cultivos de seco, los cuales en las fechas en las que se tomó la imagen ya se encuentran relativamente secos, por lo que existe una mayor concentración de sus valores de ET en torno a la media y ésta es a su vez más baja.

En relación con la temperatura de la cubierta superficial (Figura 10), se observó que en el cultivo del olivar ésta era menor en el caso de los olivares de riego que en los de seco. Si bien la diferencia no es determinante, te-

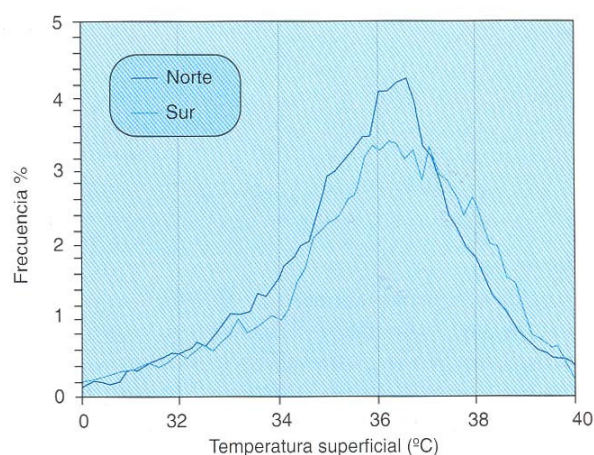


Figura 8. Histogramas de temperatura superficial para las orientaciones norte y sur

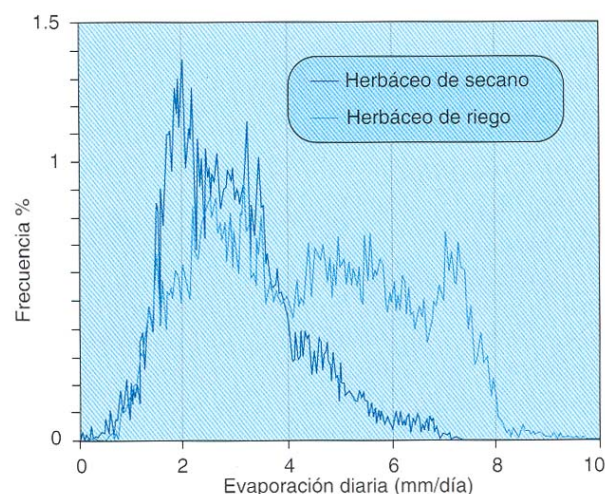


Figura 9. Histogramas de ET diaria para cultivos regados y no regados

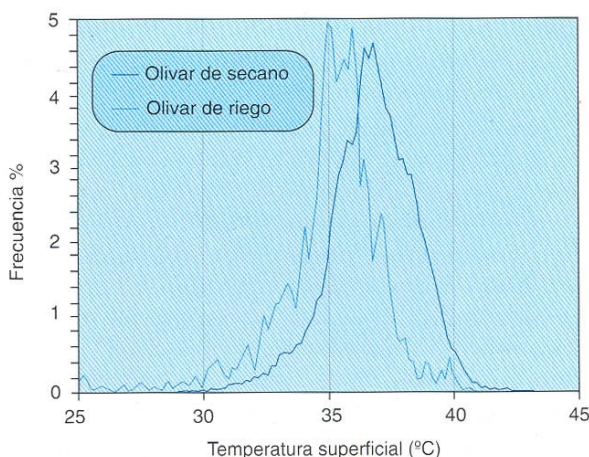


Figura 10. Histograma temperatura superficial para el olivar

niendo en cuenta que la imagen se tomó por la mañana, es posible afirmar que esta diferencia de temperatura entre cultivos regados y no regados se verá incrementada a lo largo del día. Este hecho puede posibilitar la discriminación de olivar de riego y de seco usando la banda térmica de la imagen fundamentalmente. Esto abre una gran posibilidad de discriminar el olivar de regadío, la cual es difícil de hacer de otro modo, por cuanto el olivo se riega

en esta zona por goteros ocultos bajo la copa del árbol. En lo que al albedo se refiere, se ha comprobado la diferente reflexión existente entre cultivos herbáceos regados y no regados. Sin embargo no es tan clara la distinción entre olivar de riego y de secano. Esto se debe a que la reflexión en el olivar está muy controlada por la reflexión del terreno que queda sin cubrir por el árbol.

Suelos

Por último, el análisis del albedo, temperatura superficial y evaporación sobre suelos desnudos resulta algo complicado debido a la escasa superficie de suelo desnudo con la que se está trabajando. Son muy similares los valores de evaporación entre los diferentes suelos existentes excepto los cercanos a los cursos de agua, siendo todos ellos inferiores a los mismos suelos con cubierta vegetal. Sin embargo, sería posible discriminar entre tipos de suelos partiendo de sus valores de albedo y temperatura superficial debido a que poseen diferentes características ópticas, textura, composición y estado de humedad.

CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha calibrado y validado un modelo racional de reciente creación en las condiciones del área de estudio, encontrándose un ajuste satisfactorio. El modelo propuesto tiene la ventaja de que requiere escasos parámetros experimentales, por lo que se aumenta notablemente su aplicabilidad. Debido a la alta resolución obtenida, podría ser aplicable a la determinación del estado hídrico, a la programación y evaluación de riegos en las zonas regables de la cuenca del Guadalquivir, permitiendo la optimización de los recursos hídricos.

De la respuesta del modelo a la disminución en la resolución espacial se ha concluido que es necesario trabajar con áreas más extensas (imágenes completas), dependiendo la precisión de los resultados de la heterogeneidad de la zona de estudio.

Es conveniente incluir la variable orientación del terreno en un análisis riguroso del balance de energía. Si el análisis se realiza escala regional el efecto de este parámetro en zonas relativamente llanas podría ser despreciable.

Se han encontrado diferencias evidentes de albedo, temperatura y evapotranspiración según el tipo de cultivo y su estado hídrico. En concreto, se han obtenido resultados esperanzadores a la hora de discriminar el olivar de riego del de secano, tomando como base fundamental la banda térmica de la imagen.

Se han puesto de manifiesto diferencias significativas, en la evapotranspiración, en la temperatura y en el albedo de los suelos de la zona. La discriminación de los tipos de suelo requeriría una mayor muestra de suelo desnudo de la que se ha dispuesto.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a M. Menenti y W.G.M. Bastiaanssen del Department of Water Management in Arid Zones (DLO-Winand Staring Centre, Wageningen. The Netherlands) y sus colaboradores, todos los comenta-

rios y material proporcionado para determinar la ET usando imágenes Landsat.

BIBLIOGRAFIA

- Bastiaanssen, W.G.M. y M. Menenti (1989). *Surface reflectance and surface temperature in relation with soil type and regional energy fluxes*. In: A.F. Bouwman (ed.). *Soils and the greenhouse effect*. John Wiley & Sons. Chichester, Reino Unido. 541 - 549.
- Bastiaanssen, W.G.M. (1995). *Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates*. Doctoral thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen. Holanda. 273 pp.
- Camacho, E. (1991). *Estudio de recursos agrarios del término municipal de Aguilar de la Frontera*. Sin publicar.
- ERDAS *Imagine 8.2*. User Manual
- ESRI. (1990). *Understanding GIS. The ARC/INFO Method*. Esri. New York.
- ILWIS 1.4 User Manual (1993). *The Integrated Land and Water Information System*. ITC. Enschede, Holanda
- Medina, J.L.; E. Camacho; R. López Luque. y J. Reca. (1996). *Determinación de la ET con empleo de imágenes Landsat-TM5 y su agregación a resolución NOAA-AVHRR*. (Aguadulce, Almería, 11-13 de junio de 1996).
- Medina Minuesa, J.L. (1996). *Determinación y análisis de la evapotranspiración a nivel regional mediante teledetección y sistemas de información geográfica*. Trabajo Profesional Fin de Carrera, ETSIAM, Córdoba.
- Medina J.L.; E. Camacho; J. Reca; R. López y J. Roldán. (1998). *Determination and analysis of regional evapotranspiration in Southern Spain based on remote sensing and GIS. Physics and Chemistry of the Earth*, 23(4):427-432.
- Menenti, M., W.G.M. Bastiaanssen, D. van Eick y M.A. Abd El Karim (1989). *Linear relationship between surface reflectance and temperature and their application to map evaporation of groundwater*. in: *Adv. Space Research*. Volumen 9, No 1, 165-176.
- Price, J.C. (1980). *The potential of remotely sensed thermal infrared data to infer surface soil moisture and evaporation*. *Water Resour. Res.*, 16, 787-795.
- Roerink, G. (1994). *The impact of satellite sensor resolution on the regional evaporation statistics in large-scale irrigation schemes. A case study in the Mendoza Province, Argentine*. *Internete medeling* 312. DLO Windand Staring Centre, Wageningen. Holanda.
- Reca, J.; J. Roldán; M. Alcaide y E. Camacho (1996). *Perspectivas de la teledetección en zonas regables. Riegos y Drenajes XXI*. 89:34-39.