

Cifuentes Sánchez, V.J., González Rojas, D. y Hernández Fernández-Regatillo, M. (2010): La teledetección en la gestión de la demarcación hidrográfica del Guadalquivir. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 738-758. ISBN: 978-84-472-1294-1

LA TELEDETECCIÓN EN LA GESTIÓN DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL GUADALQUIVIR

Víctor Juan Cifuentes Sánchez¹, David González Rojas², María Hernández Fernández-Regatillo³

*(1) Oficina de Planificación Hidrológica. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
Avda. República Argentina, nº 43 Acc., 1ª planta, 41071 - Sevilla (España)
vjcifuentes@chguadalquivir.es*

*(2) Estudio Pereda 4, S.L. Asistencia a Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
C/Pereda nº4, 29017 - Málaga (España)
dgonzalez@pereda4.com*

*(3) TRAGSATEC. Asistencia a Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
Avda. República Argentina, nº 43 Acc., 1ª planta, 41071 - Sevilla (España)
mhernandez@chguadalquivir.es*

RESUMEN

La CHG tiene como principal objetivo gestionar los recursos hídricos de la demarcación. La actividad y el desarrollo económico de este territorio son muy sensibles a las fluctuaciones de estos recursos, al tener en su actividad económica una fuerte presencia la agricultura de regadío. La existencia de una demanda creciente de un recurso limitado como es el agua obliga a un control más estricto de su consumo.

Para conseguir regular los recursos hídricos de la demarcación se debe disponer de métodos consistentes, fiables y rápidos que permitan obtener resultados en un margen relativamente corto de tiempo y a una escala espacial y temporal adecuada para su gestión. Entre los medios actualmente disponibles, la teledetección espacial supone una de las técnicas más prometedoras para esta finalidad, gracias a que proporciona una cobertura espacial y temporal suficientemente detallada.

Integrando esta fuente de datos que nos ofrece la teledetección en el SIG corporativo del Organismo se conseguirá un mayor conocimiento del estado de la Demarcación. Para ello, en la CHG se están llevando a cabo diversos trabajos de teledetección que permiten tener una completa visión del estado medioambiental de la demarcación, analizando imágenes tomadas por los sensores MODIS, TM, ETM+ y AWiFS.

Palabras clave: Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, Directiva Marco del Agua, Infraestructuras de Datos Espaciales, índices de vegetación, estado hidrológico.

ABSTRACT

The CHG's main objective is to manage the water resources of the demarcation. The activity and economic development in this area are very sensitive to fluctuations in these resources, as their business heavily involves the process of irrigation in agriculture. The existence of a growing demand for a limited resource such as water requires tighter control of its consumption.

To regulate the water resources of the demarcation they must possess consistent, reliable and rapid methods, enabling to them to obtain results in a relatively short time and a spatial and temporal scale appropriate for management. Among the resources currently available, spatial remote sensing is one of the most promising techniques for this purpose, by providing a sufficiently detailed spatial and temporal coverage.

By integrating this data source that offers remote sensing in the Agency's corporate GIS, will achieve a greater knowledge of the state of Demarcation. To this end, within the CHG several studies of remote sensing are taking place, which allow a complete overview of environmental status of the demarcation, analyzing images taken by the MODIS, TM, ETM + and AWIFS sensors.

Keywords: Guadalquivir River Basin Authority, the Water Framework Directive, spatial data infrastructure, vegetation indices, hydrological status.

1. INTRODUCCIÓN

La teledetección es la técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, sin tener contacto físico con ella. Su ventaja radica en que los diferentes materiales tienen distintos comportamientos frente a la radiación recibida, ya sea ésta de origen natural (radiación solar) o artificial (radar). Asimismo, un material puede tener distintos comportamientos, según su estado. De particular interés en este sentido son las variaciones en el comportamiento de la vegetación en función de su contenido en agua, lo que se verá con cierto detalle en el apartado "índices de vegetación".

El principal objetivo de la CHG es gestionar los recursos hídricos de la demarcación. La actividad y el desarrollo económico de este territorio son muy sensibles a las fluctuaciones de estos recursos, al tener en su actividad económica una fuerte presencia la agricultura de regadío. Durante la época estival las temperaturas y la evapotranspiración son muy elevadas mientras que las lluvias son escasas, justo cuando las necesidades de agua son mayores al incrementarse también la demanda para uso humano. Esta descompensación se ve aún más acentuada en épocas de sequía, en las que el Organismo se ha visto obligado a reducir las dotaciones de agua destinadas a riego. La existencia de una demanda creciente de un recurso limitado como es el agua obliga a un control más estricto de su consumo.

Para conseguir regular los recursos hídricos de la demarcación se debe disponer de métodos consistentes, fiables y rápidos que permitan obtener resultados en un margen relativamente corto de tiempo y a una escala espacial y temporal adecuada para su gestión. Entre los medios actualmente disponibles, la teledetección espacial supone una de las técnicas más prometedoras para esta finalidad, gracias a que proporciona una cobertura espacial y temporal suficientemente detallada.

Integrando esta fuente de datos que nos ofrece la teledetección en el SIG corporativo del Organismo se conseguirá un mayor conocimiento del estado de ésta. Uno de los objetivos más inmediatos es el cruce de estas imágenes con datos tanto administrativos como meteorológicos, para un control más exhaustivo del agua.

Para ello, en la CHG se están llevando a cabo diversos trabajos de teledetección que permiten tener una completa visión del estado medioambiental de la demarcación, analizando imágenes tomadas por los sensores MODIS, TM, ETM+ y AWIFS:

- Mediante el empleo de sensores de baja resolución espacial como es el MODIS, se obtiene información global sobre el estado de la vegetación y de la hidrología de la cuenca. La frecuencia de obtención de

datos (diaria) permite un control prácticamente “en tiempo real”. Estos datos permiten, entre otras cosas, valorar con mayor precisión el inicio, el final y el impacto de las sequías.

- Los satélites con sensores de media resolución espacial, como el Landsat, tienen como contrapartida una menor resolución temporal, normalmente de unas dos imágenes/mes. El mayor detalle de estas imágenes permite la realización de estudios a nivel de parcela, lo que los hacen especialmente indicados para el seguimiento de los riegos de la cuenca. Es importante tener en cuenta que éste es el principal usuario de agua en la cuenca, con casi 3.400 hm³ anuales, un 85% del total.

2. DISTINTOS TIPOS DE RESOLUCIÓN. SENSORES UTILIZADOS (LIBRO)

Se denomina resolución de un sistema a la capacidad del mismo para discriminar información de detalle en un objeto detectado. Para ello, en el caso de los sensores remotos a bordo de satélites, hay que tener en cuenta diferentes variables que van a condicionar distintas resoluciones, como pueden ser la variable espacial, espectral y temporal.

Cada una de ellas adquiere diferente importancia dependiendo del objetivo perseguido. Por ello antes de comenzar un trabajo de teledetección hay que determinar la precisión necesaria de cada tipo de resolución. Y es que existe un cierto antagonismo entre algunos tipos de resolución. Por ejemplo, para lograr mayor resolución temporal, se necesita una órbita más alta, lo cual va en detrimento de la resolución espacial.

Para los trabajos que nos ocupan, relativos al análisis de la vegetación a lo largo del tiempo en la cuenca del Guadalquivir, es importante tener en cuenta:

- La resolución espectral: Cuanto mayor sea la capacidad del sensor para reproducir la respuesta espectral del objeto observado, mayor será la posibilidad de discriminar unas coberturas de otras. En los análisis realizados en la CHG, tanto MODIS como los sensores TM y ETM+ disponen de bandas suficientes para llevar a cabo estudios de este tipo.
- La resolución temporal: Para un seguimiento continuo es conveniente disponer de una cobertura temporal de imágenes de al menos dos imágenes mensuales, para ello son adecuados tanto los sensores de alta resolución (1-2 días) como los de media (10-20 días).
- La resolución espacial: este tipo de resolución adquiere mayor o menor importancia dependiendo de la escala de trabajo. En la CHG se están llevando a cabo trabajos a gran escala, llegando a monitorizar a nivel de parcela, además de trabajos regionales a menor escala. Para ello se está combinando una media resolución espacial de los sensores del satélite LANDSAT con la adecuada resolución temporal que ofrecen los sensores MODIS.

Hoy día existe una amplia variedad de sensores, diferenciados principalmente por sus características, resoluciones y finalidad. En la siguiente tabla se presentan ordenados de menor a mayor resolución espacial, teniendo en cuenta la siguiente clasificación:

- Baja: Tamaño de píxel superior a 100 metros
- Media: Tamaño de píxel entre 15 y 100 metros
- Alta: Tamaño de píxel inferior a 15 metros

<u>Sensor</u>	<u>Satélite</u>	<u>R.Espacial (m)</u>	<u>R.Espectral (Rango μm)</u>	<u>R.Temporal</u>
SEVIRI	METEOSAT	2500	12 bandas (0.75-13.40)	15 minutos
AVHRR	TIROS NOAA	1100	5 bandas (0.58-12.50)	1 día
MODIS	TERRA AQUA	250	34 bandas (0.4-14.4)	~2 días
TM	LANDSAT5	15	8 bandas (0,45-0,90)	16 días
ASTER (VNIR, SWIR y TIR)	TERRA	15	VNIR: 3 bandas (0,52-0,86) SWIR: 6 bandas (1,60-2,43) TIR: 5 bandas (8,125-11,65)	16 días
LISS-III, LISSIV y AWiFS	IRS	5,8	LISS-III: 4 bandas (0,52-1,7) LISS-IV: 3 bandas (0,52-0,86) AWiFS: 4 bandas (0,52-1,7)	24 días
VEGETATION2	SPOT5	2,5	4 bandas (0,43-0,89)	26 días
IKONOS	IKONOS	1	5 bandas (0,45-0,90)	~3 días
BGIS 2000	QUICKBIRD	0,7	5 bandas (0,45-0,90)	1-3,5 días

Tabla 1. Resolución espacial, espectral y temporal de los distintos tipos de Sensores.

A continuación se detallan las características de los principales sensores utilizados por la CHG:

2.1 Características del sensor MODIS

El sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) se encuentra a bordo de los satélites Terra y Aqua. Estos satélites forman parte de la misión EOS (Earth Observing System) de la NASA. Proporciona una resolución radiométrica alta, de 12 bits, en 36 bandas del espectro electromagnético que abarcan longitudes de onda desde 0.4 a 14.4 μm . Dos de estas bandas poseen una resolución espacial nominal (en el nadir) de 250 metros; cinco de 500 metros, y las 29 bandas restantes, de 1 kilómetro. Un espejo rotatorio de doble cara proporciona un FOV (Field Of View) de $\pm 55^\circ$.

La órbita del Terra está diseñada para pasar el ecuador por las mañanas de norte a sur, mientras que la del Aqua lo cruza de sur a norte por las tardes. Ambas se sitúan a unos 705 kilómetros de altura y proporcionan un ancho de barrido de 2330 kilómetros. Esto permite observar toda la superficie terrestre cada uno o dos días. Por tanto, poseen unas características muy adecuadas para mejorar el conocimiento de los procesos y de la dinámica global que experimenta nuestro planeta.

2.2. Características del sensor TM del satélite Landsat

El primer satélite Landsat fue lanzado en 1972; el más reciente, Landsat 7, fue lanzado el 15 de abril de 1999. El programa Landsat es controlado por la NASA, y las imágenes recibidas son procesadas por la Agencia Geológica de los Estados Unidos (USGS).

Landsat 5 fue diseñado para que su vida útil fuese de 5 años, y tiene la capacidad de recolectar y transmitir hasta 532 imágenes por día. Se encuentra en una órbita heliosincrónica, lo cual significa que siempre pasa a la misma hora por un determinado lugar. Tiene visión de toda la superficie terrestre en un tiempo de 15 días, realizando 232 órbitas.

El sensor esencial a bordo del satélite es el Thematic Mapper (TM). A continuación se detallan las resoluciones espaciales y espectrales del sensor ETM+:

- Las bandas del espectro visible y del infrarrojo tienen una resolución espacial de 30 m (canales 1, 2, 3, 4, 5 y 7).
- Las bandas del infrarrojo térmico (canales 6L e 6H) son adquiridas con resolución de 60 metros.
- La nueva banda pancromática (canal 8) tiene 15 m de resolución espacial.

	<u>Banda 1</u>	<u>Banda 2</u>	<u>Banda 3</u>	<u>Banda 4</u>	<u>Banda 5</u>	<u>Banda 6</u>	<u>Banda 7</u>	<u>Banda 8</u>
<u>Rango μm</u>	0,45 - 0,52	0,53 - 0,61	0,63 - 0,69	0,78 - 0,90	1,55 - 1,75	10,4 - 12,5	2,09 - 2,35	0,52 - 0,90

Tabla 2. Rango de cada una de las 8 bandas del sensor TM.

2.3. Características de los sensores LISS-III, LISS-IV y AWiFS del satélite IRS

El primer satélite indio del programa IRS fue el IRS-1C, lanzado en diciembre de 1995. El último de ellos, el IRS-P6 también denominado Resourcesat-1 fue lanzado en Octubre del 2003.

IRS-P6 transporta tres sensores: LISS-III, LISS-IV y AWiFS con las siguientes resoluciones espaciales y espectrales:

<u>Bandas</u>	<u>LISS-IV</u>	<u>LISS-III</u>	<u>AWiFS</u>
Band 2 (Green)	0,52-0,59 (μm)	0,52-0,59 (μm)	0,52-0,59 (μm)
Band 3 (Red)	0,62-0,68 (μm)	0,62-0,68 (μm)	0,62-0,68 (μm)
Band 4 (NIR)	0,77-0,86 (μm)	0,77-0,86 (μm)	0,77-0,86 (μm)
Band 5 (SWIR)		1,55-1,70 (μm)	1,55-1,70 (μm)
R.Espacial	5,8 metros	23,5 metros	56...70 metros

Tabla 3. Resoluciones de los sensores LISS-III, LISS-IV y AWiFS.

Este satélite tiene una resolución temporal de 24 días y sus imágenes son adecuadas para aplicaciones avanzadas en dinámica vegetal, estimación de producción de las cosechas, como soporte para administración de desastres e inventario de recursos naturales.

3. ÍNDICES DE VEGETACIÓN

El uso de Índices de Vegetación (IVs) fue la primera herramienta eficaz para la determinación de las propiedades de las cubiertas vegetales, puesto que son capaces de aumentar la señal de la vegetación mientras que minimizan la influencia de factores distorsionantes, como el suelo, la irradiancia solar, el ángulo de elevación del sol y la propia atmósfera.

La vegetación sana presenta contraste radiométrico entre las bandas del rojo e infrarrojo cercano del espectro, por lo que los IV se basan principalmente en combinaciones aritméticas entre estas bandas. Así se definen a continuación tres de los índices más utilizados:

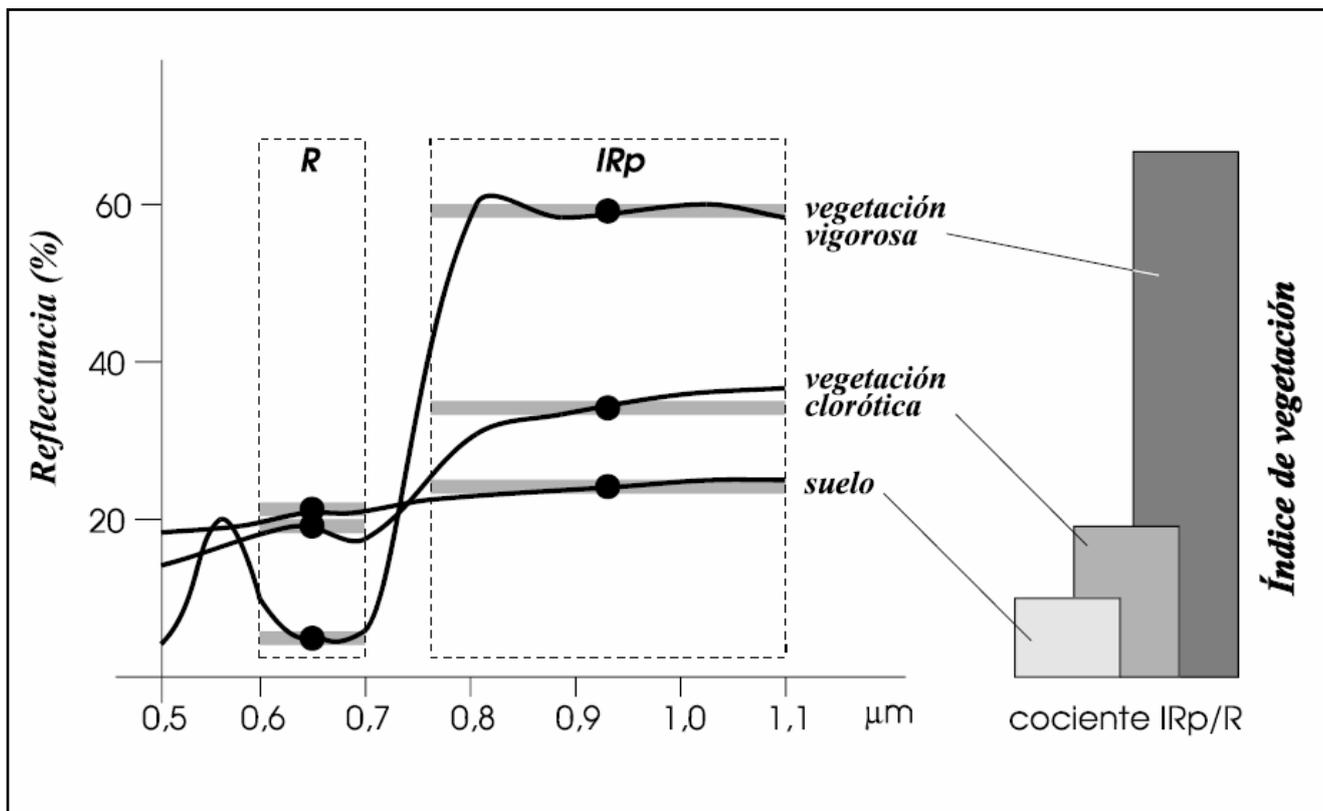


Figura 1. Contraste espectral de la vegetación sana entre las bandas R e IRC del espectro.

3.1. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

Entre los más difundidos se encuentra el "Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI)", que se define como el cociente entre la resta y la suma de las bandas del rojo e infrarrojo cercano.

$$NDVI = \frac{IRp - R}{IRp + R}$$

Donde,

R: Reflectividad en la banda del Rojo.

IRp: Reflectividad en la banda del Infrarrojo Cercano.

Una de las mayores ventajas de este índice es su fácil interpretación, ya que está acotado entre ± 1 , con un umbral crítico para las cubiertas vegetales en torno a 0,1.

Los trabajos de la CHG con imágenes del sensor MODIS comenzaron con la recopilación de imágenes quincenales de NDVI, y actualmente se dispone de una serie temporal desde febrero de 2000 hasta la actualidad, a la que se van añadiendo las nuevas imágenes. Éstas son procesadas cada quince días y en ellas se observa la vegetación de una forma más nítida debido a la ausencia de distorsiones atmosféricas como las nubes.

A continuación se muestran dos imágenes quincenales del NDVI de la cuenca del Guadalquivir:

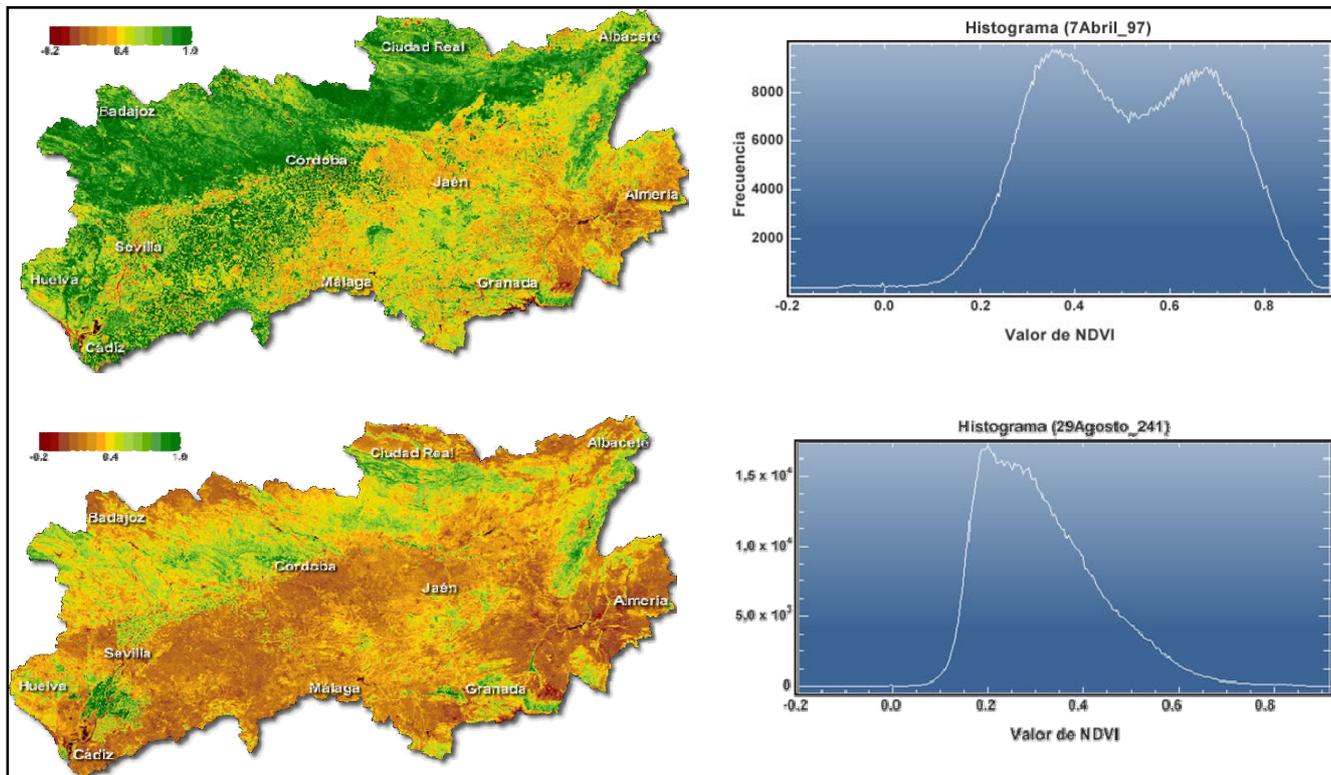


Figura 2. NDVI de dos quincenas y sus respectivos histogramas.

3.2. Índice de vegetación ajustada al suelo (SAVI)

Fue desarrollado por Huete en 1988. Se trata de un índice muy adecuado para trabajos en zonas semiáridas, donde la contribución del suelo es muy importante. Así cuando se realice un estudio sobre una zona de estas características, este índice resultará más consistente que el NDVI, gracias a esa mayor distinción entre el suelo y la vegetación.

$$SAVI = \frac{IRp - R}{IRp + R + L} \cdot (1 + L)$$

Donde,

R: Reflectividad en la banda del Rojo.

IRp: Reflectividad en la banda del Infrarrojo Cercano.

L: Factor de corrección cuyo valor puede oscilar entre 1 y 0, aunque suele emplearse el valor 0,5.

A continuación se muestra una imagen SAVI correspondiente a una escena LANDSAT de la cuenca del Guadalquivir:

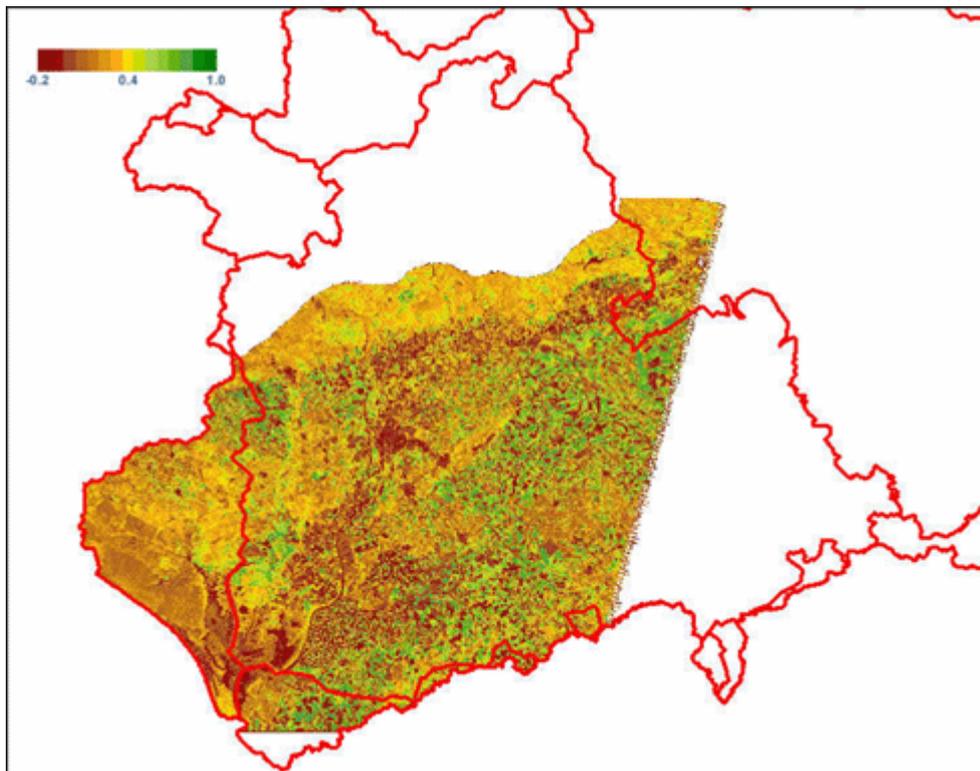


Figura 3. Imagen SAVI correspondiente a una escena LANDSAT de la cuenca del Guadalquivir.

3.3. Índice de vegetación mejorado (EVI)

Este índice obtiene la respuesta de las variaciones estructurales del dosel vegetal incluyendo el índice de área foliar LAI (Leaf Area Index), tipo y arquitectura del dosel y fisonomía de la planta. Fue desarrollado para optimizar la señal de la vegetación con sensibilidad mejorada para altas densidades de biomasa, lográndose esto al separar la señal proveniente de la vegetación y la influencia atmosférica.

$$EVI = G \cdot \frac{IRp - R}{IRp + C_1 \cdot R - C_2 \cdot A + L}$$

Donde,

A , R , IRp : Reflectividad en la banda del Azul, Rojo, e Infrarrojo Cercano.

$C_1 = 6.0$, Coeficiente de resistencia atmosférica

$C_2 = 7.5$, Coeficiente de resistencia atmosférica

$G = 2.5$, Factor de ganancia

$L = 1$, Factor de corrección

A continuación se muestra una imagen quincenal de EVI de la cuenca del Guadalquivir:



Figura 4. EVI del 13 al 28 de agosto de 2009.

4. RESULTADOS

4.1. Baja Resolución Espacial. Trabajos de la CHG con sensores MODIS. Año Hidrológico 2008-2009

Los trabajos realizados con imágenes del sensor MODIS consisten en un seguimiento y análisis continuo de la vegetación (serie temporal) de imágenes NDVI.

Actualmente en la CHG se mantienen dos series temporales de imágenes:

- **Imágenes NDVI representativas de cada quincena.**

Son imágenes provenientes de uno de los productos ya generados por la NASA, el "MOD13Q1". Estas imágenes de NDVI se obtienen mediante la composición temporal de las 16 imágenes diarias. Se realiza tomando para cada píxel, el valor máximo del índice de vegetación obtenido en ese periodo. Holben (1986) demostró que los compuestos realizados mediante máximos en un determinado periodo de tiempo reducen la influencia de las nubes, el efecto de los diferentes ángulos de visión e iluminación y la mayor o menor existencia de aerosoles en la atmósfera.

Uno de los análisis más inmediatos con estas imágenes es la comparación de la quincena recibida con todas las correspondientes a esa quincena a lo largo de la serie histórica disponible, permitiendo medir el grado de estrés de la cubierta vegetal con relación a lo que es habitual para esa fecha.

- **Imágenes acumuladas de NDVI por año hidrológico.**

Estas imágenes se obtienen sumando a cada píxel la suma de todos los valores anteriores del año para ese píxel. La primera imagen quincenal del año es idéntica a la primera imagen acumulada. La última equivale al total anual. El uso de este algoritmo permite la integración del conjunto del año hidrológico y proporciona información acerca de la cantidad de "estrés acumulado".

Los valores de NDVI obtenidos son en función del tipo de vegetación, de los factores climáticos (lluvias, evapotranspiración...) y de otros factores externos como puede ser la dotación de riego. Estas imágenes aportan información medioambiental de la demarcación del Guadalquivir de una forma continua en el tiempo.

En función de la actividad fotosintética de la vegetación, ésta aparece representada en tonos marrones, amarillos o verdes. Los tonos marrones representan las zonas más secas, con valores de NDVI entre -1 y 0,4; los píxeles que rondan el valor 0,4 aparecen de color amarillo; y aquellos que oscilan entre 0,4 y 1, se representan con tonos verdosos, indicando los verdes más intensos los valores más altos de NDVI.

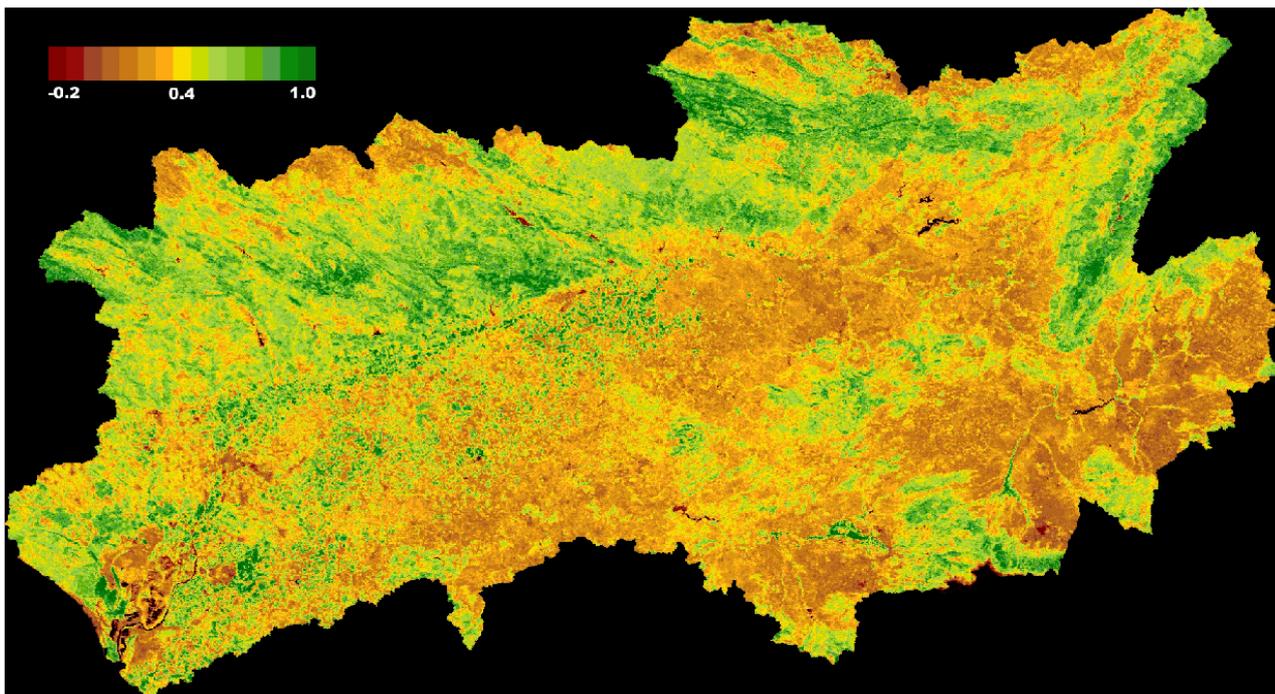


Figura 5. NDVI del 10 de junio al 25 de junio de 2010.

Una vez se dispone de una serie temporal de imágenes, son muchos y muy diferentes los análisis estadísticos que se pueden realizar con ellas para extraer información adicional. A continuación se muestra la evolución del NDVI medio para toda la cuenca en estos 9 años:

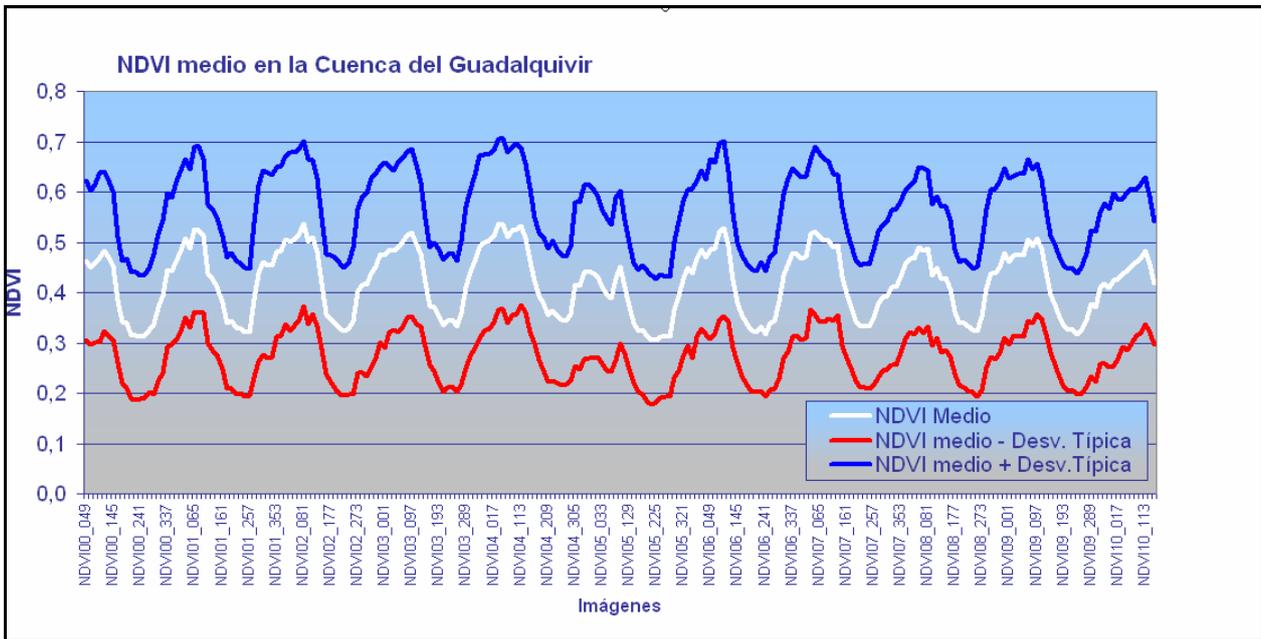


Gráfico 1. Evolución del NDVI medio para toda la cuenca en los últimos 9 años.

A continuación se muestra la evolución del NDVI en los diferentes usos de suelo que existen en la cuenca:

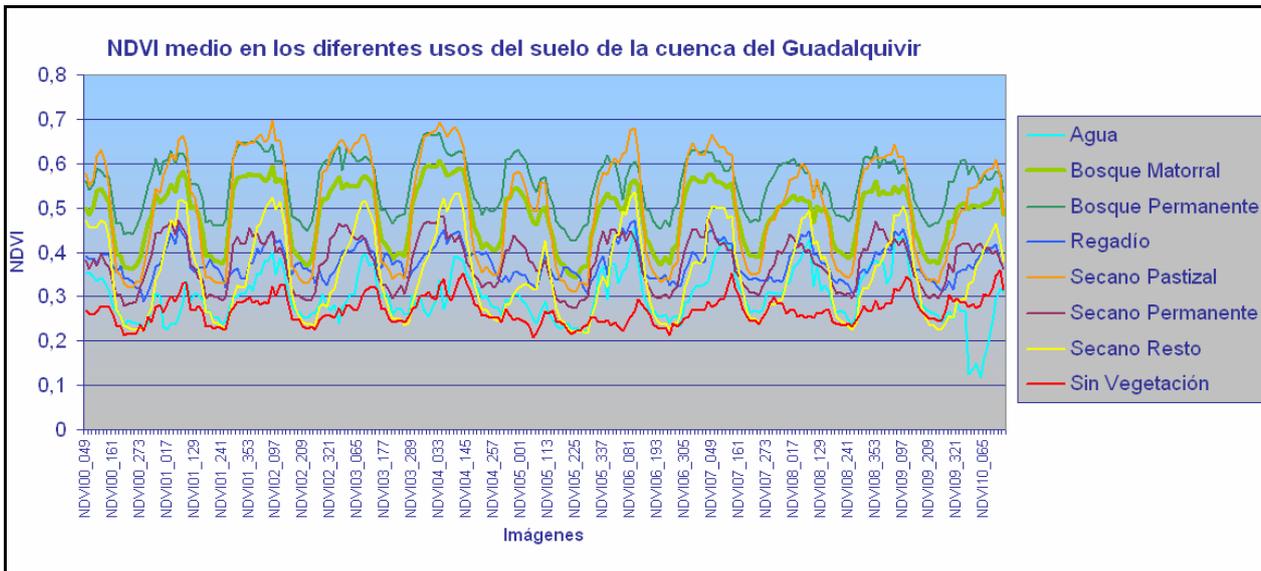


Gráfico 2. Evolución del NDVI en los diferentes usos de suelo que existen en la cuenca.

El gráfico 1 representa el desarrollo de la actividad fotosintética para el NDVI promedio de toda la cuenca en cada una de las quincenas, al igual que el siguiente, muestra cada año hidrológico en una gráfica diferente, de forma que es más intuitivo para análisis y comparaciones interanuales:

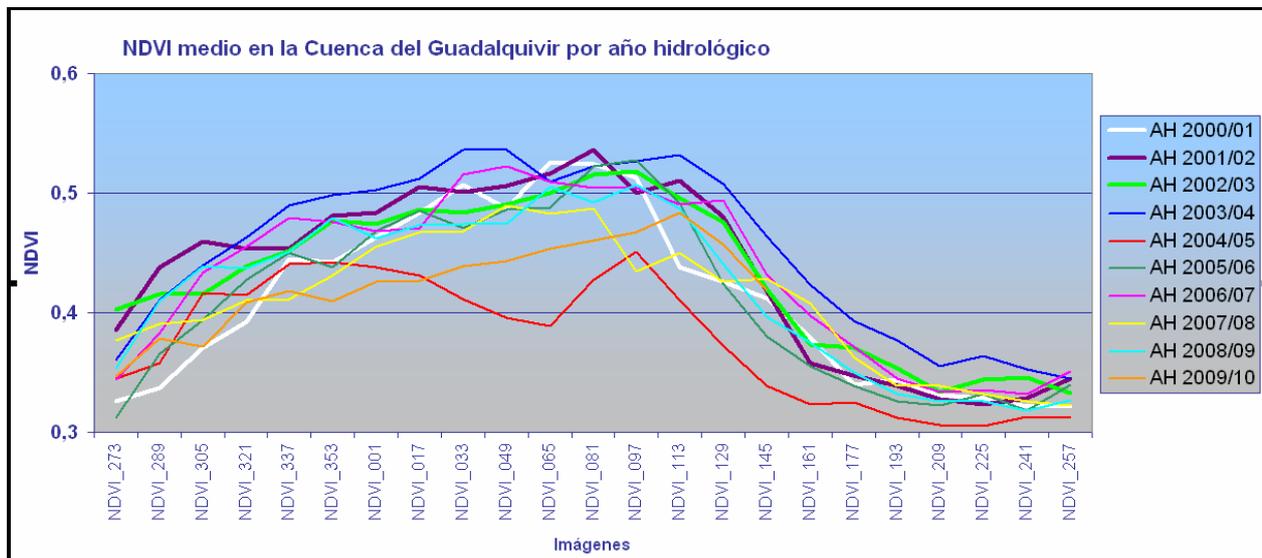


Gráfico 3. Evolución del NDVI en la Cuenca del Guadalquivir por año hidrológico.

Dentro de los análisis realizados por la CHG, se da especial importancia al caso de las sequías. Para estos estudios lo más adecuado no es el uso de NDVI, ya que la diversidad geográfica entre los usos del suelo dificulta la comparabilidad tanto espacial como temporal. En áreas muy heterogéneas, el NDVI es más alto en zonas con condiciones geográficas más favorables (clima, suelo, etc.) que en áreas con peores condiciones.

Para ello en este estudio se ha utilizado el índice VCI "Vegetation Condition Index" (Kogan, 1990). Este índice establece una proporción con relación a los máximos y mínimos de NDVI observados para cada quincena del año, ya que calculados con un número suficiente de años en los que se han producido diferentes condiciones climáticas pueden ser utilizados como criterio para cuantificar las condiciones extremas a las que se ha visto sometida la vegetación.

En este índice, el componente climático del NDVI es destacado. Para ello los valores de NDVI de cada píxel y periodo de tiempo (quincenas) son escalados linealmente entre 0 (mínimo NDVI) y 100 (máximo NDVI), obteniendo así el VCI:

$$VCI = 100 \cdot \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}}$$

Donde el NDVI es el índice de vegetación en un píxel en un momento determinado (en este caso quincenal), NDVI_{min} es el mínimo histórico en esa misma quincena y NDVI_{max} es el máximo para la misma quincena del año. Este indicador aproxima el componente relacionado con las condiciones climáticas, desde condiciones de la vegetación extremadamente desfavorables a condiciones óptimas.

Para ello, cada quince días se procesan los índices VCI correspondientes a las dos series históricas disponibles:

- Quincenas individuales: Esta imagen se obtiene a partir de las imágenes de NDVI quincenales. Para ello se compara cada quincena con esa misma en los demás años de la serie.

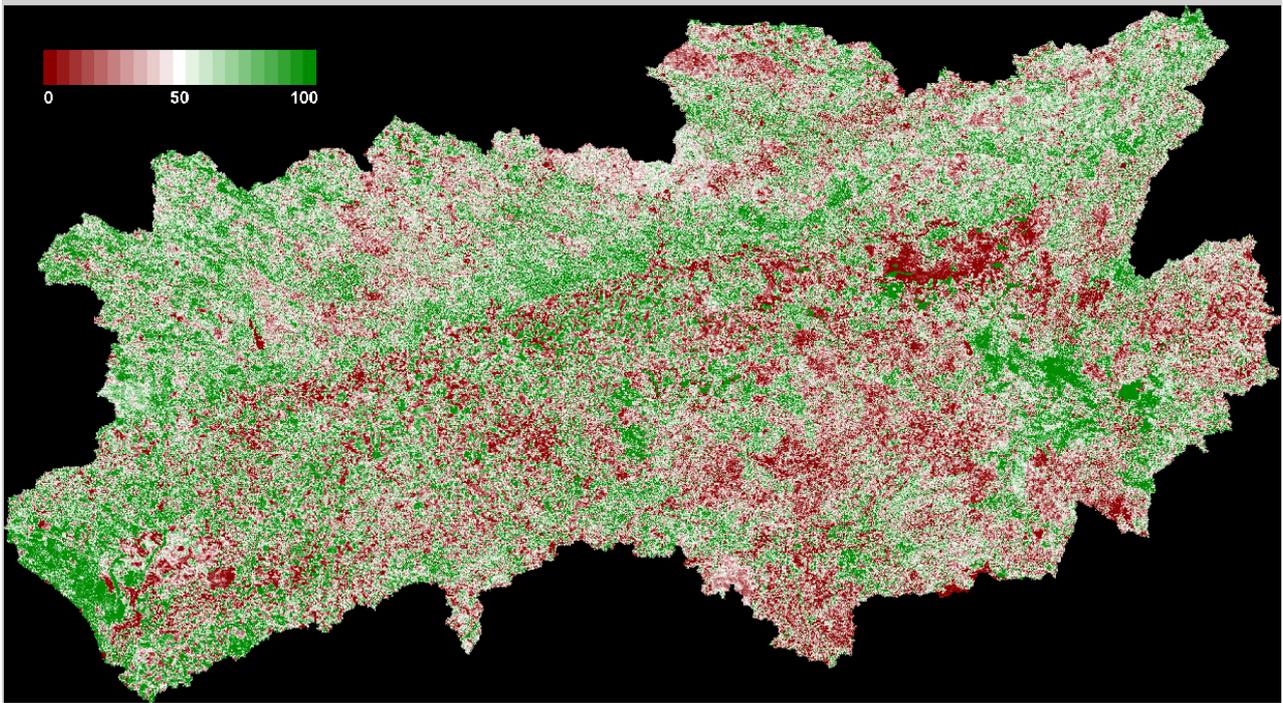


Figura 6. VCI de la quincena individual del 10 de junio al 25 de junio de 2010.

- Quincenas acumuladas: Esta imagen se obtiene a partir de las imágenes NDVI acumuladas por año hidrológico, comparándolas con las mismas acumuladas de los años anteriores.

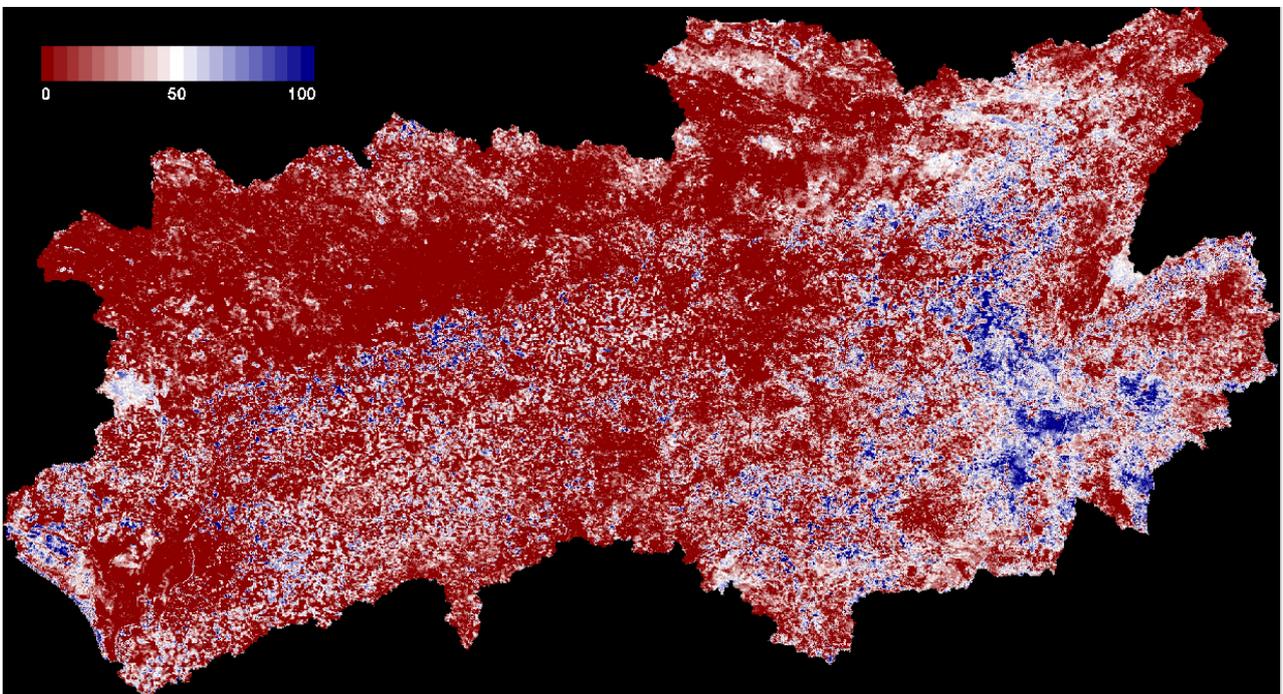


Figura 7. VCI quincenas acumuladas hasta el 25 de junio de 2010.

4.1.2. Resultados para el año hidrológico 2008-2009. Extensión al año hidrológico 2009/10

De las 23 imágenes quincenales de NDVI del año hidrológico 2008/2009, se deducen las siguientes conclusiones:

Los valores máximos aparecen, en la segunda quincena de febrero y la primera de marzo, en las zonas forestales de Sierra Morena y Cordillera Prebética, menguando posteriormente. Los valores mínimos se aprecian en las extensiones de secano, sobre todo en el SE árido de la cuenca.

Las zonas de riegos de las vegas y campiñas presentan valores de NDVI que dependen de las fechas de siembra y recogida. En general hay un comportamiento inverso al de las zonas naturales: valores bajos en invierno y un incremento desde el inicio de la primavera hasta el verano, decreciendo los valores posteriormente. Destacan las grandes extensiones de arroz del Bajo Guadalquivir, que se siembran en junio y se recogen pasado septiembre, con cierto retraso respecto a la mayor parte de los cultivos de la cuenca.

Con relación al presente año hidrológico 2009/2010, el más lluvioso desde 1996, cabe resaltar los valores generales relativamente bajos de NDVI, lo que se observar no sólo en la Figura 8, sino también en las Figuras 6 y 7 y en los Gráficos 1, 2 y 3. Estos valores pueden estar relacionados con el estrés que produce en la vegetación un exceso de agua por un encharcamiento prolongado del terreno: el NDVI mide el vigor de la vegetación. Este hecho pone de manifiesto que este índice, aunque extremadamente útil como indicador del estado hidrológico, tiene sus limitaciones y no sirve en cualquier circunstancia.

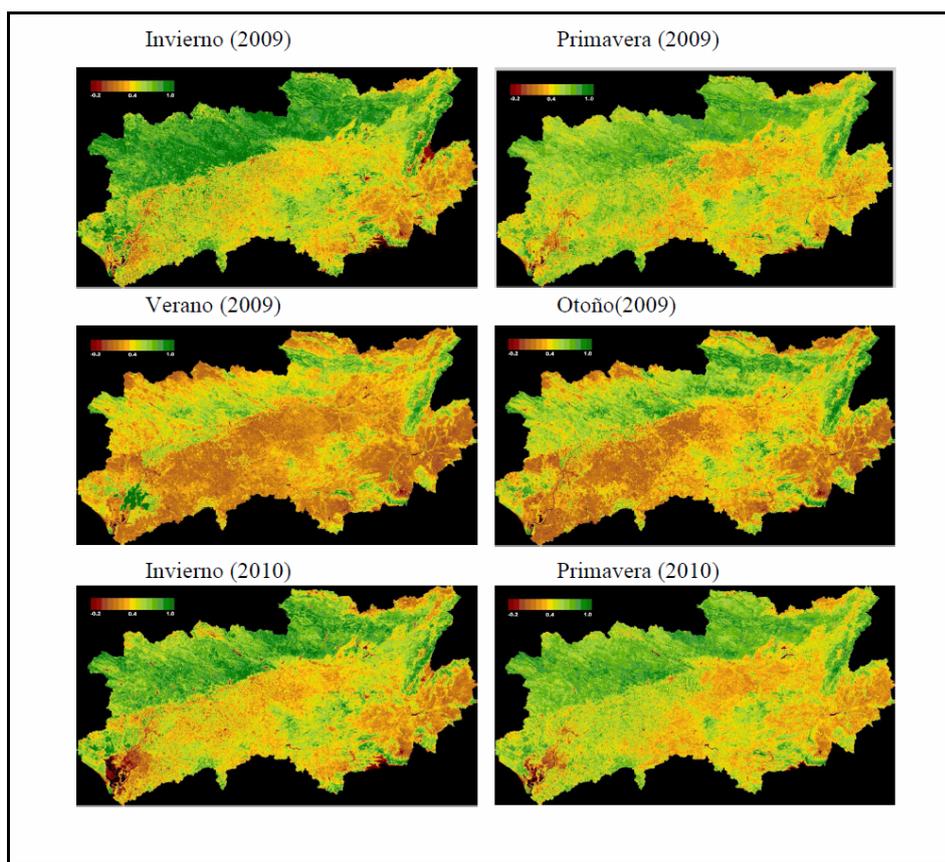


Figura 8. NDVI medio para las estaciones de verano y otoño del año hidrológico 2008-2009 e invierno y primavera del año hidrológico 2009-2010.

4.2. Media Resolución Espacial. Clasificación de cultivos y cálculo de la evapotranspiración real

En la actualidad, la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir está próxima a recibir formalmente los resultados del segundo estudio "Asistencia Técnica para la detección de regadíos y evaluación de la evapotranspiración mediante técnicas de teledetección", financiado por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y desarrollado

por la Empresa Pública Desarrollo Agrícola y Pesquero (Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía), en colaboración con el Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica (IFAPA) y el Instituto de Agricultura Sostenible (IAS-CSIC). Se presentan a continuación los resultados de la campaña de riego 2008 y los avances de la campaña 2009.

4.2.1. Metodología para la clasificación de cultivos

El cálculo de la evapotranspiración requiere el conocimiento de la distribución superficial de los cultivos para aplicar el coeficiente de cultivo adecuado.

La clasificación de cultivos 2008 partió de los usos SigPac asignados a cada recinto. Las clases correspondientes a cultivos permanentes se derivaron de forma directa: cítricos, otros frutales y olivar. El resto de usos distintos a tierra arable (TA) se agruparon en una sola clase que se denominó otros usos SigPac (edificaciones, improductivo, forestal, etc.) y que se excluyó del proceso del cálculo de la ET. Los recintos SigPac con uso TA que correspondían a cultivos bajo plástico (fresón, frambuesa, arándanos y moras), según la Cobertura de cultivos bajo plástico para la provincia de Huelva 2007-2008, se clasificaron como tales y el resto pasó a clasificarse aplicando técnicas de teledetección tal y como se describe a continuación.

Para la clasificación de cultivos no permanentes (con uso SigPac TA) mediante teledetección, se utilizaron técnicas de clasificación supervisada de la escena SAVI multitemporal. Fue necesario definir, para cada cultivo principal, un grupo de parcelas de entrenamiento y validación. Se partió de las declaraciones de cultivos del año 2008. Se seleccionaron aquellos recintos en los que se declaraba un cultivo y la superficie declarada coincidía con la catastral. Posteriormente, se seleccionaron aquellos recintos correspondientes a los cultivos principales de la zona: algodón, arroz, girasol, maíz, remolacha, cereales y tubérculos. Para cada cultivo se eliminaron los recintos que presentaban una respuesta más alejada de la media.

Este proceso de depuración se realizó aplicando el algoritmo Spectral Angle Mapper (SAM). Así, por ejemplo para el algodón, se generó una máscara con los recintos declarados como algodón; a partir de la misma se calculó el espectro (SAVI multitemporal) medio del algodón, luego se aplicó el algoritmo SAM que asignó a cada píxel declarado como algodón una medida de distancia. Los píxeles que no superaban una distancia umbral al espectro medio se confirmaban como algodón, mientras que el resto quedaban sin confirmar (figura 2). Los recintos declarados como algodón que no tenían al menos un 80% de su superficie ocupada por píxeles confirmados como algodón, se desechaban. Los recintos restantes se dividieron de forma aleatoria en dos grupos: entrenamiento y validación. Del mismo modo se procedió para el resto de los cultivos principales.

A partir de los recintos de entrenamiento se procedió a realizar la clasificación supervisada de la imagen SAVI multitemporal aplicando el Algoritmo de Máxima Verosimilitud. Se decidió que los píxeles que presentasen una probabilidad inferior al 10% de pertenecer a la clase más probable, permaneciesen sin clasificar. Se observó que los píxeles que permanecían sin clasificar correspondían a situaciones de distinta índole, como cultivos minoritarios no incluidos en la clasificación con respuesta espectral heterogénea, cultivos rotacionales como la alfalfa, zonas declaradas como no cultivadas, etc. Finalmente, las clases cultivos bajo plástico, cultivos permanentes o cubierta vegetal permanente en TA y píxeles sin clasificar, se agruparon en una sola que se denominó TA Otros.

Los resultados de la clasificación supervisada se validaron a nivel de recinto a partir del grupo de recintos de validación (100 recintos por cultivo, extraídos aleatoriamente del grupo de recintos de validación), generando la correspondiente matriz de confusión. Las parcelas de entrenamiento de los cultivos principales permitieron extraer la signatura espectral de los mismos y calcular su separabilidad espectral. En la siguiente gráfica se observa que arroz y algodón muestran una separabilidad baja, a pesar de que al final de la primavera y a principios del verano el SAVI es inferior en el arroz y en fechas posteriores es inferior en el algodón. Como la confusión en estas clases era evidente se decidió imponer a la clasificación obtenida inicialmente una condición que obligara a los píxeles clasificados como algodón en zonas arroceras a reclasificarse como arroz.

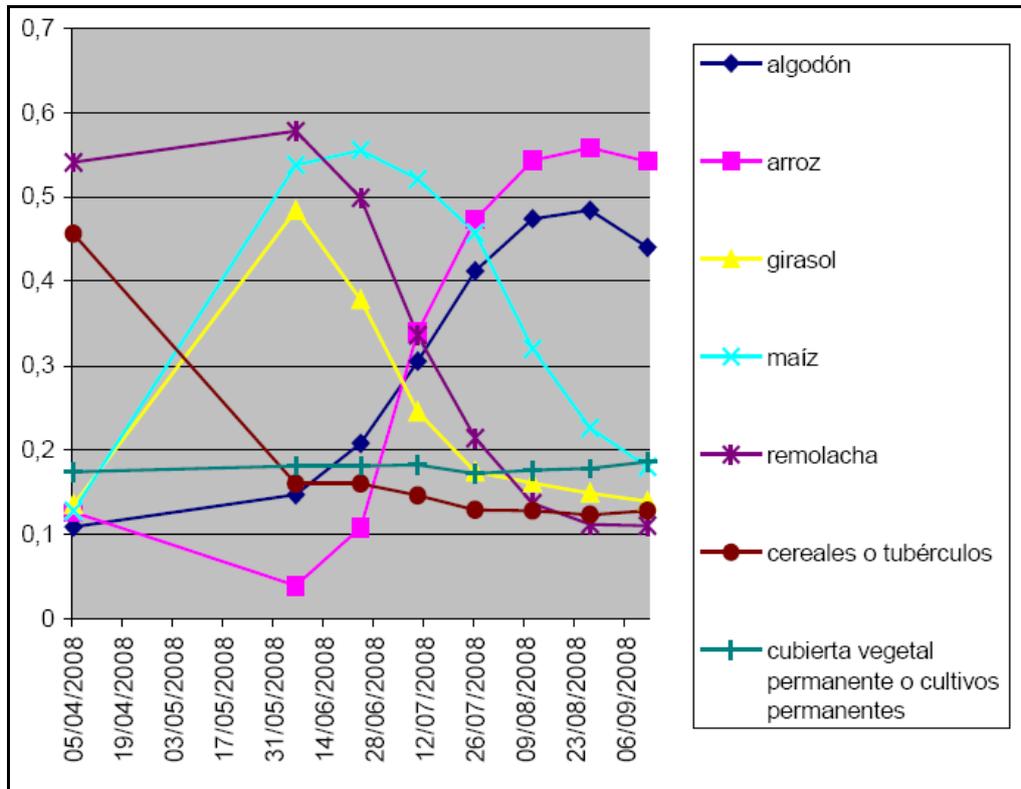


Gráfico 4. Evolución del SAVI de las distintas clases consideradas en la clasificación supervisada y derivados de las parcelas de entrenamiento.

El resto de combinaciones de pares de clases, muestran una separabilidad aceptable (valores por encima de 1,9 indican una buena separabilidad), si bien existe algo de confusión entre las clases:

- girasol y maíz
- cereales o tubérculos y cubierta vegetal permanente o cultivos permanentes en TA.

Los resultados de la clasificación de cultivos no permanentes (TA) se integraron con la información derivada de SigPac, dando lugar al mapa de clasificación de cultivos 2008 que se utilizó en el cálculo de la evapotranspiración y que se presenta en la siguiente figura.

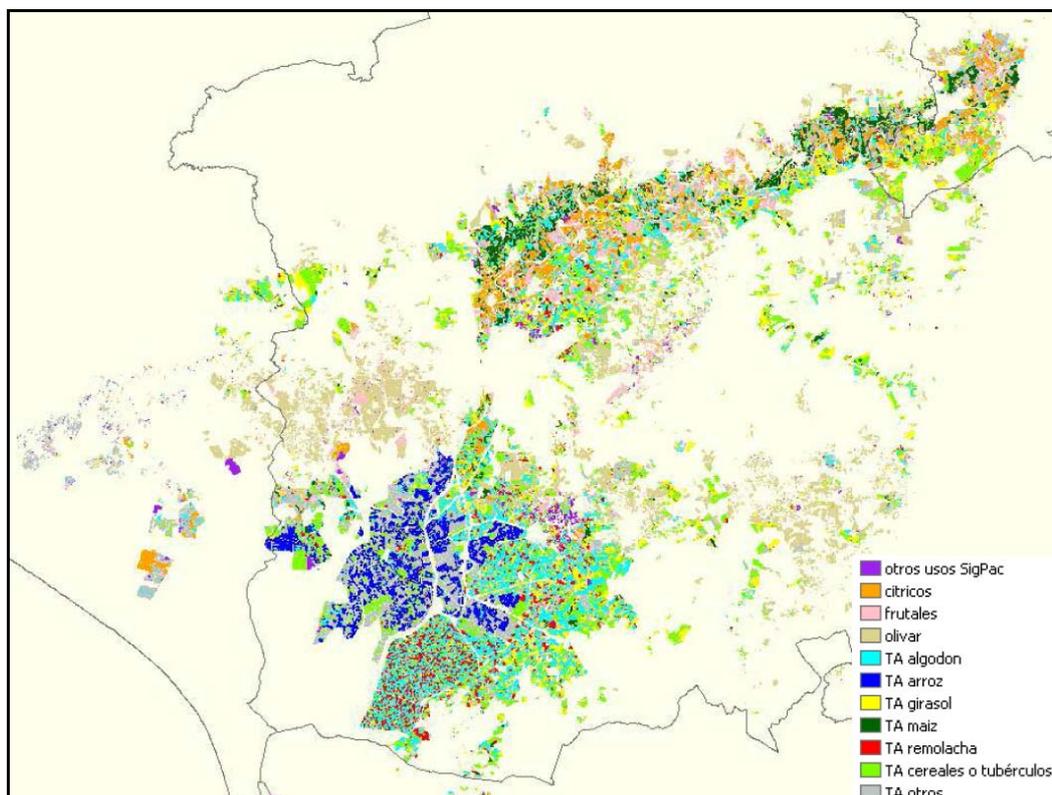


Figura 9. Clasificación de cultivos para la campaña 2008.

4.2.2. Metodología para el cálculo de la evapotranspiración real de los cultivos

La evapotranspiración real de los cultivos (ET, mm) se ha calculado usando el procedimiento propuesto por FAO1, basado en el concepto de coeficiente de cultivo y evapotranspiración de referencia.

$$ET = K_c \cdot ET_0$$

El coeficiente de cultivo (K_c) engloba la influencia del cultivo sobre la evapotranspiración, contemplando el efecto de las variaciones de las propiedades biofísicas de la planta (fundamentalmente altura y cobertura del suelo) a lo largo del ciclo de crecimiento. La evapotranspiración de referencia, (ET_0) en mm, recoge el efecto del clima, estableciendo la demanda de la atmósfera en un periodo determinado y su estimación se realiza usando información meteorológica.

El coeficiente de cultivo, en su versión dual, se obtiene de la expresión $K_c = K_{cb} + K_e$, en la que el primer componente es el coeficiente de cultivo basal (K_{cb}), calculado en función de la fracción de cobertura del cultivo (F_c) en cada píxel de la imagen, que a su vez se deriva directamente del índice de vegetación. El segundo componente, el coeficiente de evaporación (K_e), depende del porcentaje de cobertura, el tipo de suelo, la frecuencia de riego o precipitación y la fracción de suelo humedecida. Se puede estimar calculando un balance diario de agua en el suelo parcela a parcela, requiriendo para ello mapas de propiedades hidráulicas del suelo, datos de precipitación, frecuencia y tipo de riego. La dificultad de obtener esta información para un gran número de parcelas, como sería necesario en esta aplicación a escala de cuenca, ha llevado a formular un modelo sintético de coeficiente de cultivo. Este modelo parte del coeficiente de cultivo basal y formula una relación $K_{cb} - K_c$ a partir de múltiples simulaciones del balance de agua en el suelo para una parcela estándar. De esta manera se tiene en cuenta, además del porcentaje de cobertura del suelo, la frecuencia de lluvia y una frecuencia (y fracción de humedecimiento) de riego asumida, esto es, los principales factores que afectan al coeficiente de evaporación K_e .

4.2.3. Resultados

Tras aplicar la metodología descrita, se obtuvieron un total de 20 imágenes raster de ET acumulado decenal y un raster con la ET acumulada para todo el periodo de estudio. Hay que tener en cuenta, en la interpretación de resultados, que la primera y la última decena del periodo de estudio están incompletas. Así, dado que la primera imagen se adquirió el 5 de marzo, la primera decena de marzo acumula la ET de 6 días únicamente (del 5 al 10 de marzo). Por otra parte, dado que la última imagen se adquirió el 12 de septiembre, la última decena acumula la ET únicamente de 2 días (11 y 12 de septiembre).

La información de estos raster de ET sola o combinada con la clasificación de cultivos, permite elaborar cartografías de ET decenales o acumuladas para todo el periodo, así como extraer estadísticos de la evolución temporal de la ET por cultivos, ET acumulada total por cultivos, etc.

Si se combina la información de estos raster con el parcelario de la zona de estudio, se pueden extraer, mediante análisis zonales, datos de ET decenal y acumulada a nivel de zona regable. A nivel de recinto del parcelario se puede obtener la proporción observada de cada cultivo, cultivo principal si lo hubiere, ET decenal o acumulada, etc., siempre teniendo en cuenta que la resolución espacial de los raster de ET y el mapa de cultivos es de 30 metros y esto puede implicar que en recintos pequeños (con alguna dimensión cercana o inferior a los 30 metros) se extraiga información incorrecta.

Al acumular la ET diaria durante todo el periodo de estudio, del 5 de marzo al 12 de septiembre de 2008, se obtiene el mapa presentado en la siguiente figura. Las zonas de color verde oscuro representan las superficies con mayor ET decenal. Las zonas de color ocre representan áreas sin vegetación o con vegetación seca, donde la evapotranspiración es muy baja. Las superficies que presentan mayor ET estacional coinciden con las parcelas de riego dedicadas al cultivo del arroz en el Bajo Guadalquivir.

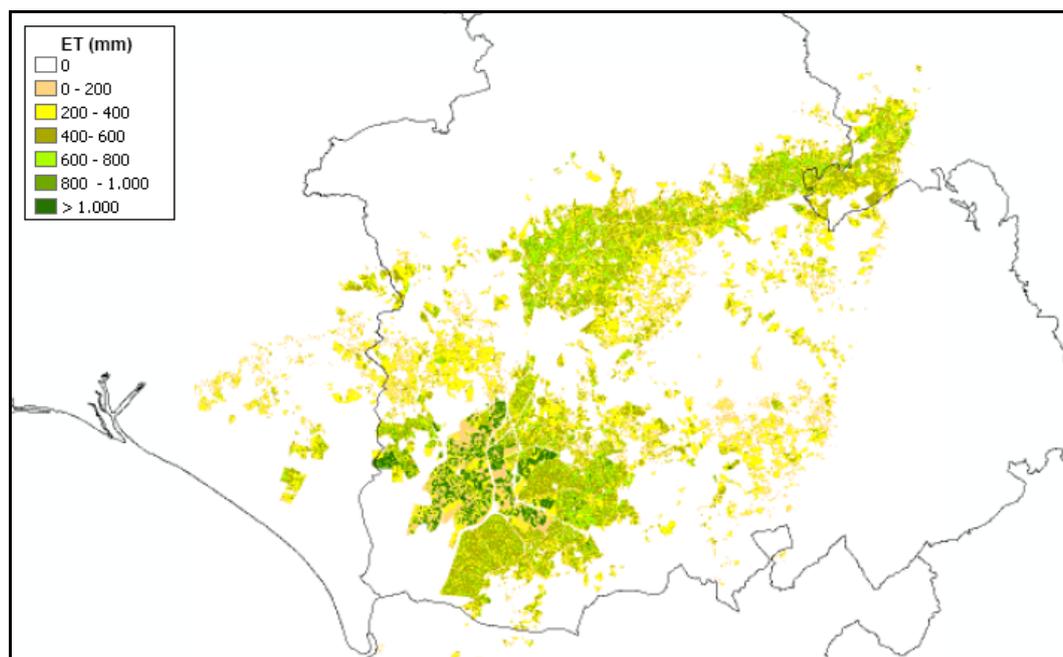
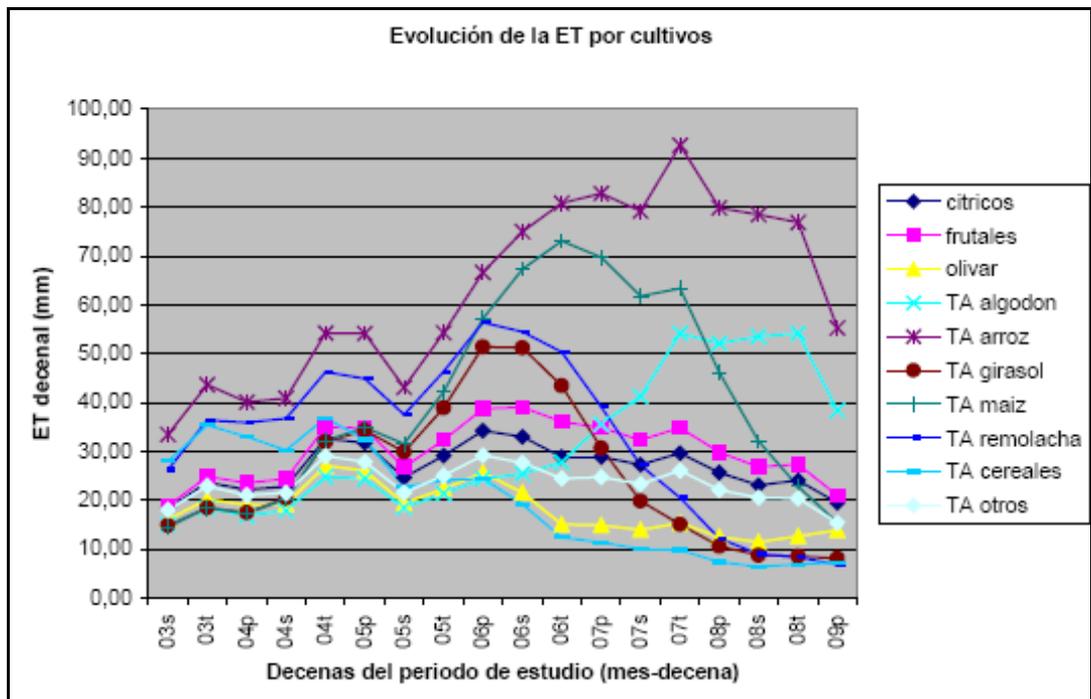


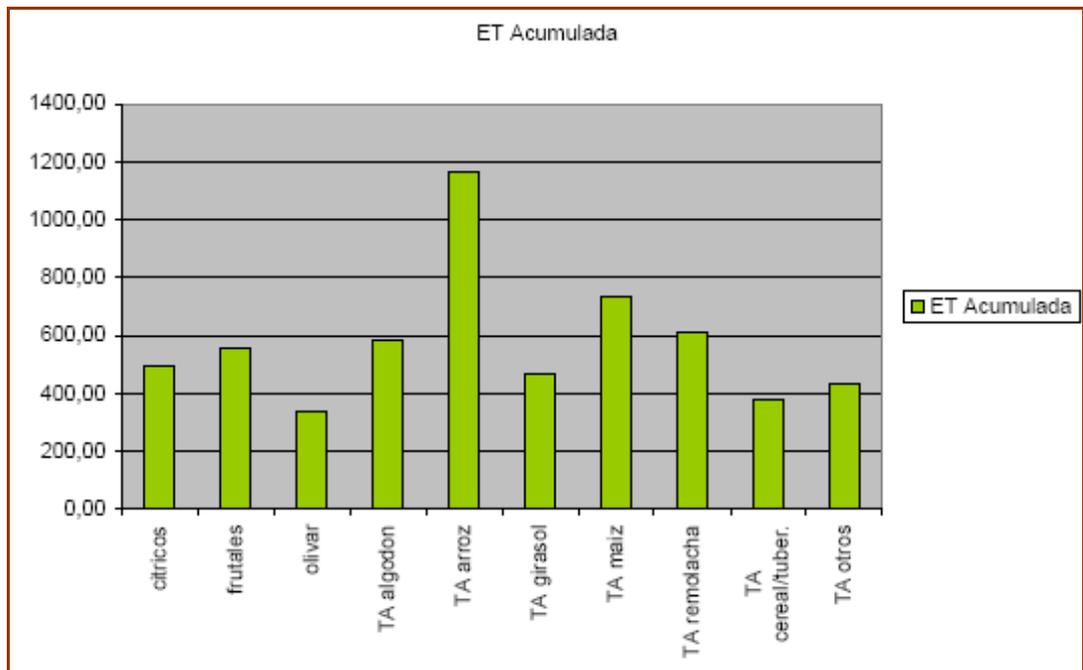
Figura 10. ET acumulada en el periodo de 5 de marzo a 12 de septiembre de 2008.

Utilizando la clasificación de cultivos realizada para la campaña 2008, es posible estimar la evolución de la ET para los distintos cultivos en el periodo de estudio. En la siguiente figura se representa la evolución de la ET para los distintos cultivos, contemplados en la clasificación, en las distintas decenas correspondientes al periodo de estudio. Se ha excluido la primera y la última decena de estudio por estar incompletas.



Gráfica 5. Evolución de la ET decenal observada para los distintos cultivos.

Finalmente se recoge la ET acumulada por cultivos para el periodo de estudio. Las cifras de ET más elevadas corresponden a zonas ocupadas por arroz (1164 mm), seguidas de las zonas ocupadas por maíz (732 mm). Las zonas ocupadas por olivar y cereales o tubérculos son las que presentan unas cifras de ET más baja durante el periodo estudiado.



Gráfica 6. ET acumulada por cultivos para el periodo de estudio.

4.2.3. Avances de la campaña 2009.

El ámbito del trabajo lo constituye la parte de la Demarcación que se encuentra incluida en las pasadas LANDSAT 202-34, 201-34, 200-34.

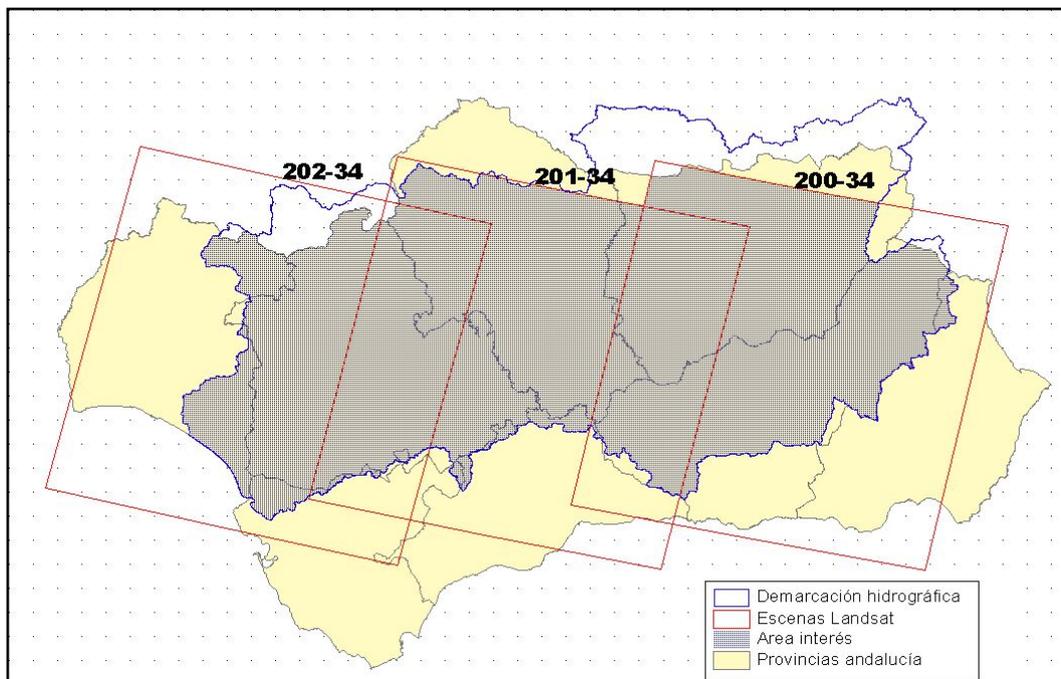


Figura 11. ET acumulada por cultivos para el periodo de estudio.

En cuanto a las mejoras metodológicas:

- El kc para Olivar será mensual y no el anual de FAO.
- Se harán ajustes para el cálculo de la ET de arroz.
- En base a la bibliografía se asignará un Kc a choperas.
- Se incluirá, en la campaña, el periodo no prioritario, asumiendo que el cálculo de la ET será grosero por la falta de disponibilidad de imágenes y que en esta campaña el objetivo va dirigido más a definir las cuestiones metodológicas específicas de este periodo.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chuvieco Salinero, E. (2008): Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio. Ariel, Barcelona, 594 pp.
- Chuvieco Salinero, E. (1990): Fundamentos de la Teledetección. Rialp, Madrid, 453 pp.
- Pinilla, C. (1995): Elementos de Teledetección. RA-MA, Madrid, 309 pp.
- Gilabert, M.A., González-Piqueras, J., García-Haro, J. (1997): Acerca de los índices de vegetación. Revista de Teledetección (Nº 8, diciembre 1997). 10 pp.
- Huete, A., Didan, K., Jacobson, Yuan, Y., Ratana, P., Sirikul, N., Pichai, P. (2004): *Modis Spectral Vegetation Indices*. Presentación en: modis.gsfc.nasa.gov/sci_team/pres/
- Modis/Terra Vegetation Indices: edcdaac.usgs.gov/modis/mod13q1v5.asp
- Modis Website: modis.gsfc.nasa.gov/dataproducts.php?MOD_NUMBER=13
- Vicente-Serrano, S. (2004): *Evaluación de las consecuencias ambientales de las sequías en el Sector Central del valle del Ebro mediante imágenes de satélite: posibles estrategias de mitigación*. Premio Cesa tesis 2004.