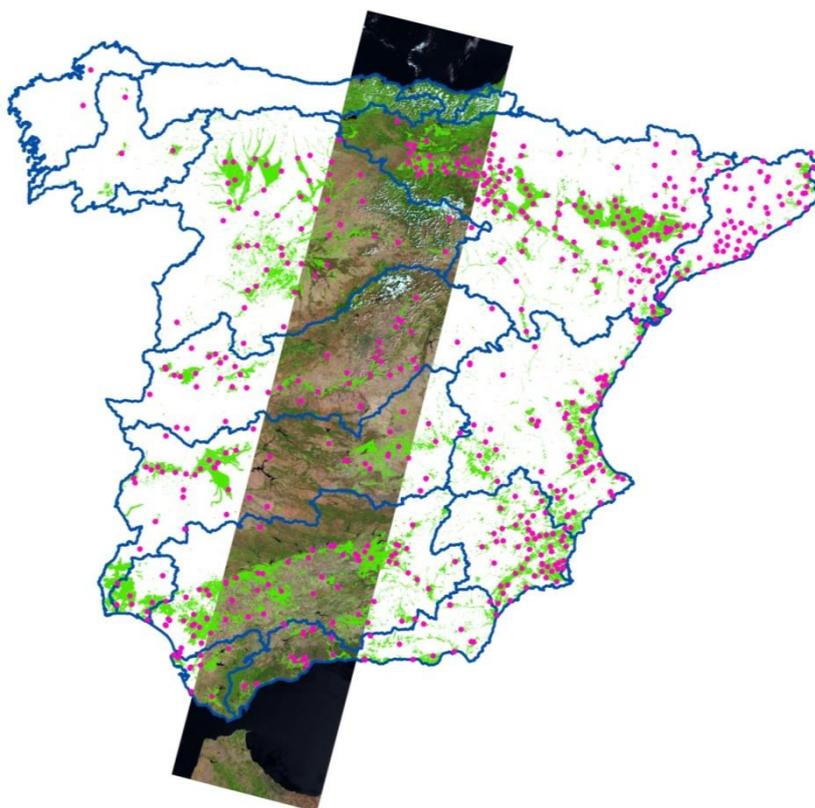


# INNOVACIÓN EN EL REGADÍO



**Un uso más eficiente del agua integrando  
Red SIAR, TELEDETECCIÓN Y SIG**  
Proyecto SPIDER-CENTER. Informe final. Enero, 2016

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE  
Subdirección General de Regadíos y Economía del Agua  
Centro Nacional de Tecnología de Regadíos, CENTER  
Grupo Tragsa

UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA. Sección de Teledetección y SIG



# **ESTUDIO DE INNOVACIÓN PARA UN USO MÁS EFICIENTE DEL AGUA EN EL REGADÍO MEDIANTE HERRAMIENTAS BASADAS EN LA RED SIAR, TELEDETECCIÓN Y SIG. AÑOS 2014 – 2015**

## **Ficha Técnica del Estudio**

### ***Investigador responsable y coordinador***

Alfonso Calera Belmonte

### ***Investigadores***

Santiago Castaño Fernández

Antonio Quintanilla Ródenas

### ***Técnico responsable y coordinador***

Jesús Garrido Rubio

### ***Técnicos***

Irene Arellano Alcázar, Lorena Fraile Enguita

Mario Belmonte Mancebo, Sergio Sánchez Prieto

**SECCIÓN DE TELEDETECCIÓN Y SIG. INSTITUTO DE DESARROLLO REGIONAL.  
UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA.**

*Con la colaboración técnica de la Empresa De Transformación Agraria, S.A., (TRAGSA) y de la Subdirección General de Regadíos y Economía del Agua (SGRYEA), Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal, Secretaría General de Agricultura y Alimentación, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA).*

### **TRAGSA**

Cristina Madurga del Cura  
Alejandro Sánchez de Ribera González

### **SGRYEA - MAGRAMA**

Joaquín Rodríguez Chaparro, Manuel Navarro  
Comalrena de Sobregrau, Raquel Bravo Rubio,  
Jesús López Tapia, Carolina Escobedo López

**Estudio realizado en el marco del Convenio de 19 de septiembre de 2014 firmado por:**

**EMPRESA DE TRANSFORMACIÓN AGRARIA, S.A.  
UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA**



## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

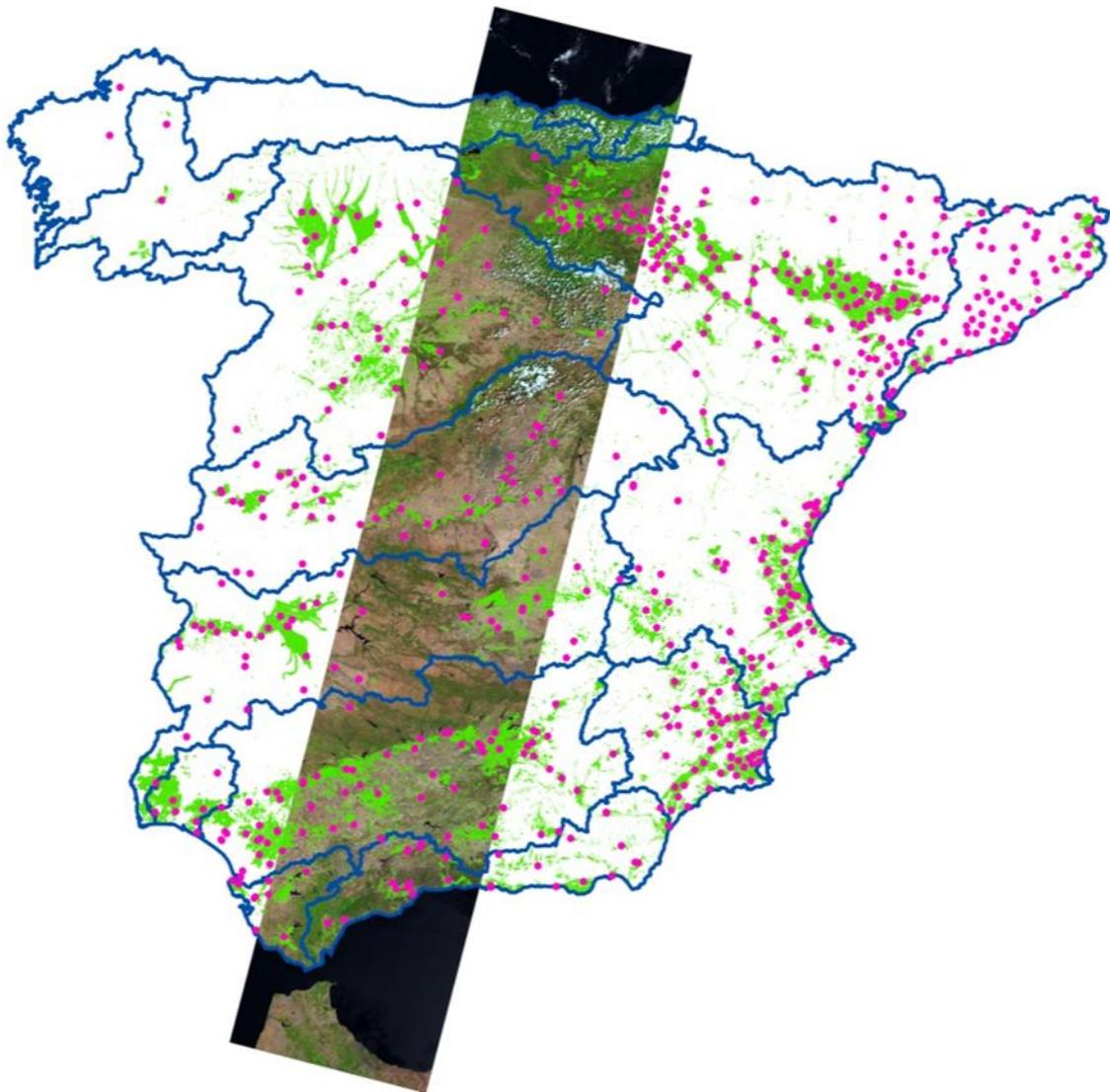
El trabajo consiste en la realización de un estudio para contribuir a la mejora en la eficiencia del uso de agua en el regadío español, potenciando el papel clave que tiene la red de estaciones meteorológicas **SIAR** (*Sistema de Información Agroclimática para el Regadío*) en la mejora de dicha eficiencia, utilizando para ello secuencias temporales de imágenes de satélite, la propia red **SIAR** y distribuyendo productos y servicios a los usuarios mediante herramientas WebSIG. Pretende pues ajustar el riego a aplicar a la demanda del cultivo y contribuir así con motivo de la Directiva Marco del Agua a responder a las demandas que las políticas europeas establecen en el uso del agua y en relación a la monitorización y control de las superficies regadas y los consumos hídricos originados. Asimismo, proporciona herramientas para la formación y capacitación, transferencia de tecnología y de difusión del conocimiento, de referencia nacional e internacional.

Para ello, en el ámbito espacial de la España peninsular como se muestra en la Figura 1, se pretende describir la evolución de cultivos, identificar las superficies en regadío durante los años 2014 y 2015, y estimar sus consumos hídricos, utilizando conjuntamente series temporales de imágenes multiespectrales adquiridas por satélites de observación de la tierra y la meteorología desde la red **SIAR**. Uno de los elementos claves de innovación ha sido poner a disposición de los usuarios toda la información generada, además de información cartográfica auxiliar, mediante una plataforma WebSIG accesible vía internet. La resolución espacial de trabajo es la del pixel de la secuencia temporal de imágenes, aproximadamente una hectárea.

El amplio rango de beneficiarios abarca todos los usuarios del agua, entre otros: regantes particulares, gestores de comunidades de riego, servicios públicos y privados de asesoramiento, y gestores de la administración que traten con la planificación de los recursos hídricos a medio y largo plazo mediante la ejecución y seguimiento de los planes hidrológicos de cuenca.

El informe que aquí se presenta se ha estructurado en tres secciones; la primera, denominada Parte A, es una memoria-resumen en la que se recogen de forma sintética los aspectos principales del trabajo y los resultados obtenidos. La Parte B detalla cómo acceder vía internet a la información y cómo manejar las series temporales de imágenes junto a las 414 estaciones de la red **SIAR**, para conocer la evolución del cultivo en la parcela y obtener las necesidades de riego. Finalmente, la parte C describe en detalle la metodología empleada y resultados obtenidos. Es necesario resaltar que este informe se complementa con toda la información cargada en el sistema WebSIG desarrollado para este proyecto, que permite realizar consulta para cualquier punto de la superficie terrestre de la España península a lo largo de los años 2014 y 2015.

El trabajo, en adelante denominado **SPIDER-CENTER**, se ha encargado y seguido en su desarrollo por la Subdirección General de Regadíos y Economía del Agua (SGRYEA), y en su gestión por el CENTER (Centro Nacional de Tecnología de Regadío), en colaboración con el Grupo TRAGSA. **SPIDER-CENTER** ha sido elaborado por la Sección de Teledetección y SIG del Instituto de Desarrollo Regional (IDR) de la Universidad de Castilla La Mancha (UCLM).



**Figura 1.** Ámbito espacial del proyecto **SPIDER-CENTER** en donde se representan 414 estaciones agroclimáticas de la red **SIAR**, RuralCat y La Rioja (puntos rosas), sobre las zonas regables provisionales del Plan Nacional de Regadíos Horizonte 2020 (manchas verdes), las diferentes demarcaciones hidrográficas presentes en la España peninsular (polígonos azules) y una imagen combinación color RGB capturada por el satélite Landsat 8

## INDICE DEL INFORME FINAL

### INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS ..... 5

### PARTE A. MEMORIA - RESUMEN ..... 13

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	15
2. INTEGRACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN Y DE LA RED AGROCLIMÁTICA SIAR PARA LA MONITORIZACIÓN DE LAS SUPERFICIES AGRÍCOLAS REGADAS Y SUS NECESIDADES HÍDRICAS.....	15
2.1. <i>Procesado de imágenes de satélite multiespectrales</i> .....	17
2.2. <i>Clasificación de cultivos de regadío.</i> .....	19
3. RESULTADOS DE LA MONITORIZACIÓN DE LAS SUPERFICIES AGRÍCOLAS REGADAS Y SUS NECESIDADES HÍDRICAS. ....	24
3.1. <i>Resultados de las superficies agrícolas regadas.</i> .....	24
3.2. <i>Resultados de las necesidades hídricas estimadas.</i> .....	28
4. ACCESO A LAS SECUENCIAS TEMPORALES DE IMÁGENES DE SATÉLITE Y SUS PRODUCTOS MEDIANTE EL SISTEMA SPIDERWEBGIS®.....	29
4.1. <i>Secuencias temporales de imágenes de satélite.</i> .....	29
4.2. <i>Usos del suelo.</i> .....	29
4.3. <i>Mapas temáticos de variables agroclimáticas y balance de agua en suelo.</i> .....	29
4.4. <i>Cartografía auxiliar.</i> .....	30
5. DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO SPIDER-CENTER ESPAÑA.....	31
5.1. <i>XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección (Sevilla, 2015)</i> .....	31
5.2. <i>Jornada técnica de innovación en gestión del regadío mediante redes agroclimáticas, teledetección y sistemas de información. (Madrid, 2015).</i> .....	31
5.3. <i>XXVI Jornadas de paralelismo (Córdoba, 2015).</i> .....	31
6. EJEMPLOS DE MONITORIZACIÓN EN PARCELA OBSERVADOS EN SPIDER-CENTER ESPAÑA.....	32
6.1. <i>Maíz en regadío, comunidad de usuarios Ingeniero Eugenio Olid, Cádiz.</i> .....	33

6.2.	<i>Cultivo del arroz y pivot cultivado en anillos en el delta del Ebro</i> .....	34
6.3.	<i>Crecida del río Ebro</i> .....	35

## **PARTE B. CÓMO USAR LA INFORMACIÓN PRESENTADA EN EL SISTEMA SPIDERWEBGIS® PARA DETERMINAR LAS NECESIDADES DE AGUA Y RIEGO ..... 37**

1.	<b>ACCESO A SECUENCIAS TEMPORALES DE IMÁGENES DE SATÉLITE, SUPERFICIES EN REGADÍO SU BALANCE DE AGUA EN LA ESPAÑA PENINSULAR. PROYECTO WEBGIS SPIDER-CENTER. AÑOS 2014-2015</b> .....	39
1.1.	<i>Introducción y acceso al sistema</i> .....	39
1.2.	<i>Productos disponibles</i> .....	40
1.3.	<i>Manual de uso</i> .....	42
2.	<b>GUÍA RÁPIDA DEL USUARIO</b> .....	43
3.	<b>DETERMINACIÓN DE LAS NECESIDADES DE AGUA Y DE RIEGO MEDIANTE ESTACIONES METEOROLÓGICAS Y SERIES TEMPORALES DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES</b> .....	49
3.1.	<i>Introducción y objetivos</i> .....	49
3.2.	<i>Determinación de las necesidades hídricas: metodología kc-ETo basada en teledetección</i> .....	49
3.3.	<i>Disponibilidad de imágenes de índices de vegetación. El sistema webgis SPIDER</i> .....	53
3.4.	<i>Aplicación a cultivos herbáceos</i> .....	55
3.5.	<i>Aplicación a la viña y cultivos leñosos</i> .....	58
3.6.	<i>Balance de agua en el suelo y definición del coeficiente de estrés hídrico</i> .....	65

## **PARTE C. MATERIALES, MÉTODOS Y RESULTADOS ..... 68**

1.	<b>METODOLOGÍA DE LOS PRODUCTOS BÁSICOS</b> .....	70
1.1.	<i>Descripción metodológica del procesado</i> .....	70
1.2.	<i>Dimensión del procesado, ámbito espacial y temporal</i> .....	71
1.3.	<i>Imágenes empleadas</i> .....	72

1.4.	<i>Adquisición de imágenes</i> .....	72
1.5.	<i>Correcciones radiométricas</i> .....	74
1.6.	<i>Correcciones atmosféricas</i> .....	75
1.7.	<i>Procesado de NDVI</i> .....	75
1.8.	<i>Procesado de RGB</i> .....	76
1.9.	<i>Procesado de la máscara de nubes/sombras</i> .....	77
1.9.1.	<i>Máscara de nubes</i> .....	78
1.9.2.	<i>Máscara de sombras</i> .....	79
1.9.3.	<i>Combinación de máscara de nubes y sombras (mns)</i> .....	81
1.9.4.	<i>Aplicación de la máscara de nubes y sombras a la imagen ndvi</i> .....	81
1.10.	<i>Procesado de imágenes coeficiente basal de cultivo (kcb)</i> .....	82
1.11.	<i>Detalle de las imágenes procesadas en fechas y productos</i> .....	83
1.12.	<i>Desarrollo de software: integración de los anteriores procesos manuales en un software para procesado automático</i> .....	93
<b>2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS EN EL PROCESO DE CLASIFICACIÓN DE USOS DEL SUELO EN REGADÍO MEDIANTE RECURSOS DE TELEDETECCIÓN Y APOYO CARTOGRÁFICO.....</b>		<b>96</b>
2.1.	<i>Esquema general del procedimiento de clasificación.</i> .....	96
2.2.	<i>Material empleado en la clasificación</i> .....	97
2.3.	<i>Diferenciación del material empleado para la obtención de las diferentes clases.</i> .....	97
2.4.	<i>Curvas características de evolución de ndvi para diferentes usos del suelo.</i> .....	98
2.5.	<i>Procedimiento de clasificación supervisada por arboles de decisión</i> .....	99
2.6.	<i>Incorporación de la información cartográfica disponible.</i> .....	102
2.7.	<i>Resultados de clasificación de usos de suelo en regadío</i> .....	103
2.8.	<i>Explotación secuencias temporales kcb</i> .....	107
<b>3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y METODOLÓGICAS EN EL PROCESO DE SIMULACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS DIARIAS MEDIANTE HIDROMORE.</b>		<b>114</b>
3.1.	<i>Aspectos metodológicos del modelo empleado por hidromore</i> .....	114
3.1.1.	<i>El modelo FAO56 de Coeficiente Dual.</i> .....	114
3.1.2.	<i>Asimilación del coeficiente de cultivo basado en reflectividad.</i> .....	114
3.1.3.	<i>Cultivos en condiciones no estándar. Balance de agua en la capa de suelo.</i> .....	114
3.1.4.	<i>Componentes del balance de agua en el suelo: Las necesidades de agua de riego.</i> ..	116

3.2.	<i>Material de entrada</i> .....	117
3.3.	<i>Resultados de las necesidades hídricas por demarcaciones hidrográficas.</i> .....	120
3.4.	<i>Integración de la red siar en la estimación diaria de las necesidades hídricas.</i> .....	120
3.5.	<i>Integración de la red de estaciones agrometeorológicas de cataluña</i> .....	136

<b>BIBLIOGRAFÍA EMPLEADA</b> .....	<b>143</b>
------------------------------------	------------

**INNOVACIÓN EN EL REGADÍO**

*Un uso más eficiente del agua integrando Red SIAR, Teledetección y SIG*  
*Proyecto SPIDER-CENTER 2014 - 2015*



**INNOVACIÓN EN EL REGADÍO**

*Un uso más eficiente del agua integrando Red SIAR, Teledetección y SIG*  
*Proyecto SPIDER-CENTER 2014 - 2015*



**INNOVACIÓN EN EL REGADÍO**  
**UN USO MÁS EFICIENTE DEL AGUA INTEGRANDO**  
**RED SIAR, TELEDETECCIÓN Y SIG**  
**Proyecto SPIDER-CENTER**  
**2014 – 2015**

**PARTE A. MEMORIA - RESUMEN**



## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

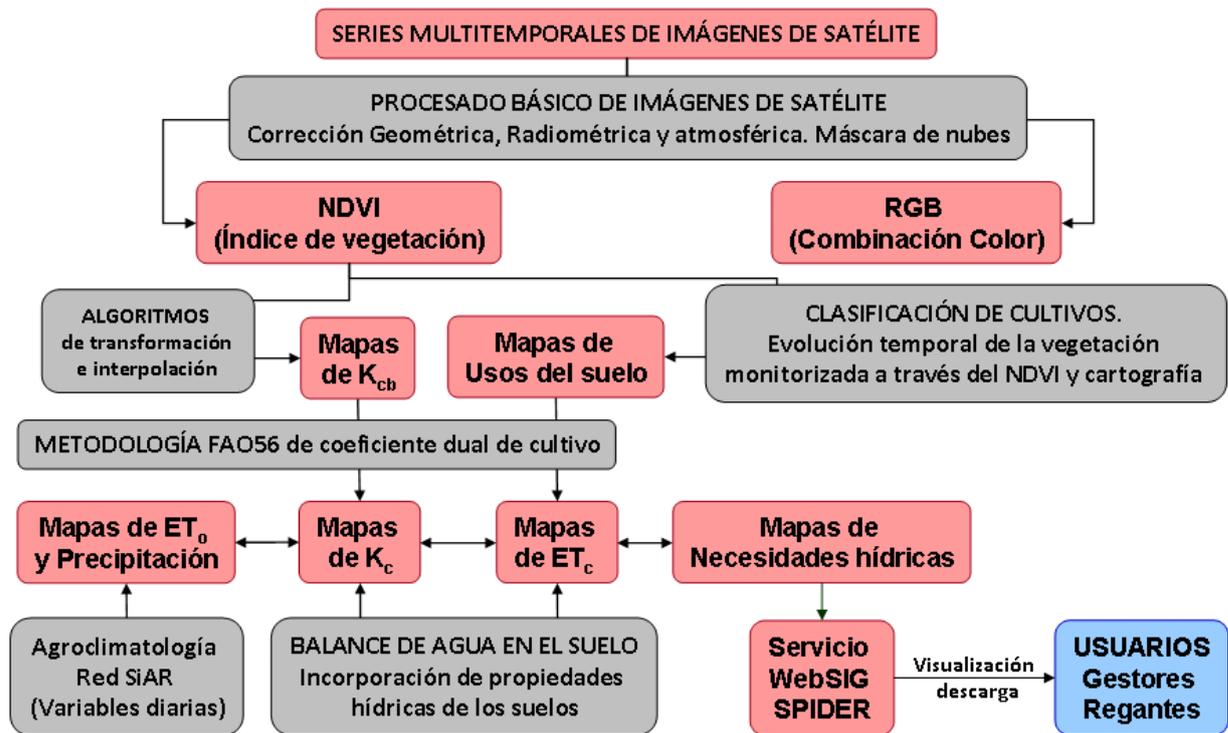
La Parte A Memoria-Resumen que aquí se presenta, recoge de forma sintética los aspectos principales del trabajo realizado y los resultados obtenidos. En consecuencia, **SPIDER-CENTER** pone a disposición de los diferentes usuarios del agua, a través de la plataforma **SPIDERWebSIG®** (<http://maps.spiderwebgis.org/webgis/>), los siguientes productos y servicios generados en el ámbito espacial de la España peninsular (Figura 1) durante los años 2014 – 2015:

- Secuencias temporales formadas por 1155 imágenes multispectrales tomadas por los satélites Landsat 8 (principalmente) y Spot 5, con el fin de monitorizar en parcela los cultivos en regadío mediante: a) índices de vegetación (NDVI); b) imágenes en color (RGB); y c) coeficiente basal de cultivo (Kcb).
- Secuencias mensuales y anuales de mapas temáticos para la monitorización de zonas regables de: a) variables agroclimáticas de demanda evapotranspirativa (ET<sub>o</sub>) y precipitación (P); y b) componentes del balance de agua en suelo asistido por teledetección e integrado con la red **SIAR** como son la evapotranspiración de los cultivos (ET<sub>c</sub>) y las necesidades hídricas de los mismos (R).
- Información de las anteriores secuencias mensuales agregadas espacialmente a las zonas regables de interés tales como: demarcaciones hidrográficas actualizadas a los nuevos planes hidrológicos de cuenca.
- Información cartográfica de interés como la localización de las estaciones de la red **SIAR** o los recintos SIGPAC por provincias, así como la búsqueda por localización al incorporar el buscador de Google® maps.

## 2. INTEGRACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN Y DE LA RED AGROCLIMÁTICA SIAR PARA LA MONITORIZACIÓN DE LAS SUPERFICIES AGRÍCOLAS REGADAS Y SUS NECESIDADES HÍDRICAS

La monitorización de las superficies regadas y sus consumos hídricos, así como políticas para fomentar un uso eficaz y sostenible de agua son acciones recogidas por la Directiva Marco Agua, DMA (European Parliament, 2000). Actualmente, y según el tercer informe en materia de aplicabilidad de dicha directiva, se ha puesto el foco en contabilizar el volumen de agua como herramienta para un uso racional de la misma (European Commission, 2012). En este contexto, y considerando grandes extensiones de territorio como una cuenca hidrográfica, la monitorización de cultivos y sus recursos hídricos es posible mediante la teledetección (Bastiaanssen et al., 2000; Calera et al., 2005; Moran et al., 1997). Bajo estos antecedentes, y por primera vez a nivel peninsular mediante técnicas de teledetección, se aborda el estudio y conocimiento de las superficies regadas y sus consumos hídricos. En consecuencia, el objetivo es integrar la información multispectral recogida por los satélites y la información producida

por la red **SIAR**. Su combinación permite monitorizar y estimar las necesidades hídricas de los cultivos mediante un balance de agua en el suelo asistido por teledetección, espacial y temporalmente distribuido (Garrido-Rubio et al., 2012). En la siguiente Figura 2 se muestra el esquema metodológico empleado para tal fin.



**Figura 2.** Esquema metodológico de trabajo en **SPIDER-CENTER** para la integración de la teledetección y de la red **SIAR**. Dicho esquema contiene varias partes de trabajo bien diferenciadas por las que finalmente se obtienen diferentes productos válidos en la monitorización de las superficies regables. Así mismo, cada tipo de producto atiende a diferentes escalas espaciales de trabajo, con lo que da servicio a diferentes usuarios del agua como se muestra en la (Tabla 1)

**Tabla 1.** Alcance de los productos y servicios generados por **SPIDER-CENTER**

Segmento de trabajo	Productos generados	Alcance de los servicios
Procesado de imágenes de satélite	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Secuencias temporales de imágenes NDVI, RGB y Kcb</li> </ul>	Monitorización a escala de parcela en tiempo real por usuarios privados del agua como regantes y/o asesores
Clasificación de cultivos en regadío	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mapas temáticos de cultivos en regadío.</li> <li>▪ Mapas de cambios en el uso del suelo de regadío</li> </ul>	Monitorización en escalas de trabajo crecientes por gestores del agua en comunidades de regantes y administraciones
Balance de agua en el suelo. Estimación de las necesidades hídricas	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mapas temáticos de la evapotranspiración actual (ETc)</li> <li>▪ Mapas temáticos de las necesidades de riego (R)</li> </ul>	Monitorización en varias escalas de trabajo en escalas de trabajo crecientes por usuarios privados del agua como regantes y/o asesores y gestores del agua en comunidades de regantes y administraciones
Distribución de la información vía servicios Web GIS	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Plataforma de distribución de la información (<b>SPIDERwebGIS®</b>)</li> </ul>	Acceso de forma libre y gratuita que permite la monitorización en tiempo real y desde cualquier punto geográfico

## 2.1. PROCESADO DE IMÁGENES DE SATÉLITE MULTIESPECTRALES

El número total de imágenes procesadas es de 1155. El proyecto **SPIDER-CENTER** se ha basado principalmente en el procesado de imágenes procedentes del satélite Landsat 8 (<http://landsat.usgs.gov/landsat8.php>), con las que se ha cubierto la península entera al trabajar con las 37 escenas disponibles sobre ella. Con una resolución espacial de 30x30m, es posible la observación de las cubiertas vegetales en parcelas con una superficie igual o mayor a 1ha. Landsat 8, con un periodo de revisita de 16 días, presenta una zona de solape entre pasadas que disminuye dicho periodo y facilita imágenes cada 8 días. En la Figura 3 se detalla el número de imágenes procesadas por escena. Las imágenes con alta cobertura nubosa no han sido procesadas. Además se han procesado 4 escenas del satélite Spot 5 (<http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/spot-5/>) durante el año 2015, ubicadas en Girona, Barrax, Valencia y Madrid. Gracias a su resolución espacial de 10x10m simulando la resolución del satélite europeo Sentinel-2A (<http://www.esa.int>), el usuario mejora la monitorización en parcela.

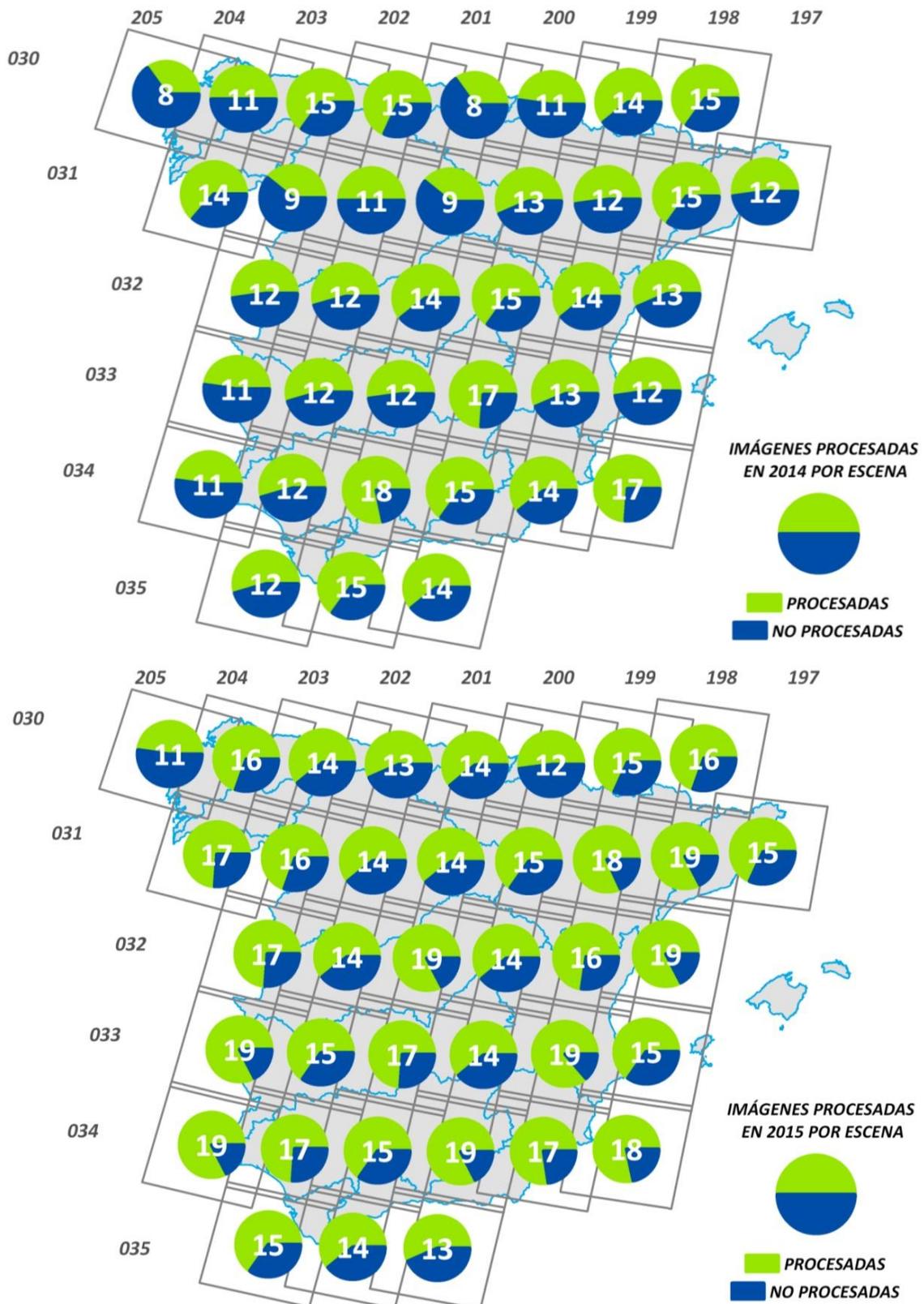
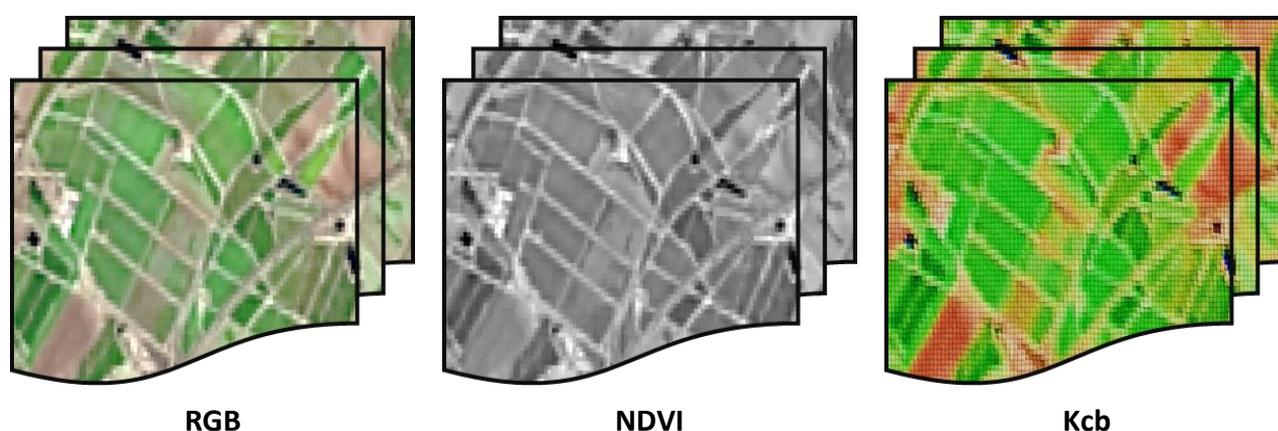


Figura 3. Número de imágenes procesadas por escena Landsat 8 en ambos años de estudio

En consecuencia, a partir de las 1155 imágenes procesadas, se ha generado una densa secuencia temporal de imágenes NDVI, RGB y Kcb. Así, por cada uno de estos productos el usuario dispone de 1155 imágenes NDVI, RGB y Kcb. Éste último producto, de gran valor para la estimación de las necesidades hídricas, se ha distribuido libre de nubes y sombras. A este conjunto de productos los hemos denominado productos básicos (Figura 4). Por tanto, los productos básicos, orientados a la monitorización en parcela, pueden ser aprovechados por regantes o servicios de asesoramiento al riego. Mediante las secuencias temporales de imágenes RGB el usuario puede observar cualitativamente la evolución de sus parcelas y detectar posibles uniformidades. Esta información, acompañada cuantitativamente por las secuencias temporales de NDVI le facilitará el diagnóstico de sus cultivos. Por último, mediante las series temporales de Kcb el usuario puede utilizar una información capital a la hora de programar los riegos de forma eficiente. Siendo además una información personal y directamente obtenida de su parcela.



**Figura 4.** Conjunto de productos básicos tras el procesados de las imágenes Landsat 8 y resolución espacial generados en **SPIDER-CENTER**

## 2.2. CLASIFICACIÓN DE CULTIVOS DE REGADÍO.

Se han generado dos mapas de usos de suelo en regadío por cada año de estudio (2014 - 2015), a escala 30x30m que abarcan la España peninsular. Para su construcción, la metodología se basa en la combinación de una clasificación basada en secuencias multitemporales de imágenes NDVI, junto con el análisis e integración de múltiples fuentes cartográficas mediante herramientas SIG. En consecuencia, el conocimiento de la evolución temporal de las diferentes cubiertas vegetales ha sido el instrumento esencial en la identificación de los cultivos de regadío, pues la evolución temporal del NDVI derivado de dichas secuencias permite describir la evolución temporal de la cubierta vegetal. Por lo tanto, se puede hacer el seguimiento mediante el NDVI de las diferentes fases de desarrollo en el crecimiento del cultivo. Resaltar que, aquellos cultivos que presenten una similar evolución fenológica y de cobertura del suelo presentarán una similar evolución en su NDVI (Calera et al., 1999).

La generación de estos mapas de usos de suelo en regadío es un instrumento esencial en la monitorización de las zonas regables por los gestores del agua. Su estudio permite identificar

los cultivos y su evolución sobre el territorio lo que aporta una poderosa herramienta para desarrollar la planificación. La Tabla 2 muestra las diferentes clases de usos del suelo en regadío clasificadas, con su código y leyenda visual que aparece en el sistema **SPIDERwebGIS®**.

**Tabla 2.** Usos de suelo en regadío clasificados por el proyecto **SPIDER-CENTER**

Grupo	Uso del Suelo	Leyenda	Descripción
<b>Cultivos herbáceos en regadío</b>	Regadíos de Primavera (RP)		Desarrollo fenológico centrado en la primavera
	Regadíos de Verano (RV)		Desarrollo fenológico centrado en el verano
	Regadíos de Primavera - Verano (RPV)		Desarrollo fenológico en primavera y verano
	Regadíos de Otoño - Invierno (ROI)		Desarrollo fenológico en otoño e invierno
<b>Cultivos leñosos en regadío</b>	Viñedo (VR)		Diferentes especies vitivinícolas.
	Olivar (OR)		Diferentes especies oleícolas.
	Cítricos (FC)		Diferentes especies de árboles cítricos.
	Frutales (FR)		Diferentes especies de árboles frutales.
<b>Invernadero</b>	Invernaderos (INV)		Agricultura bajo invernaderos.

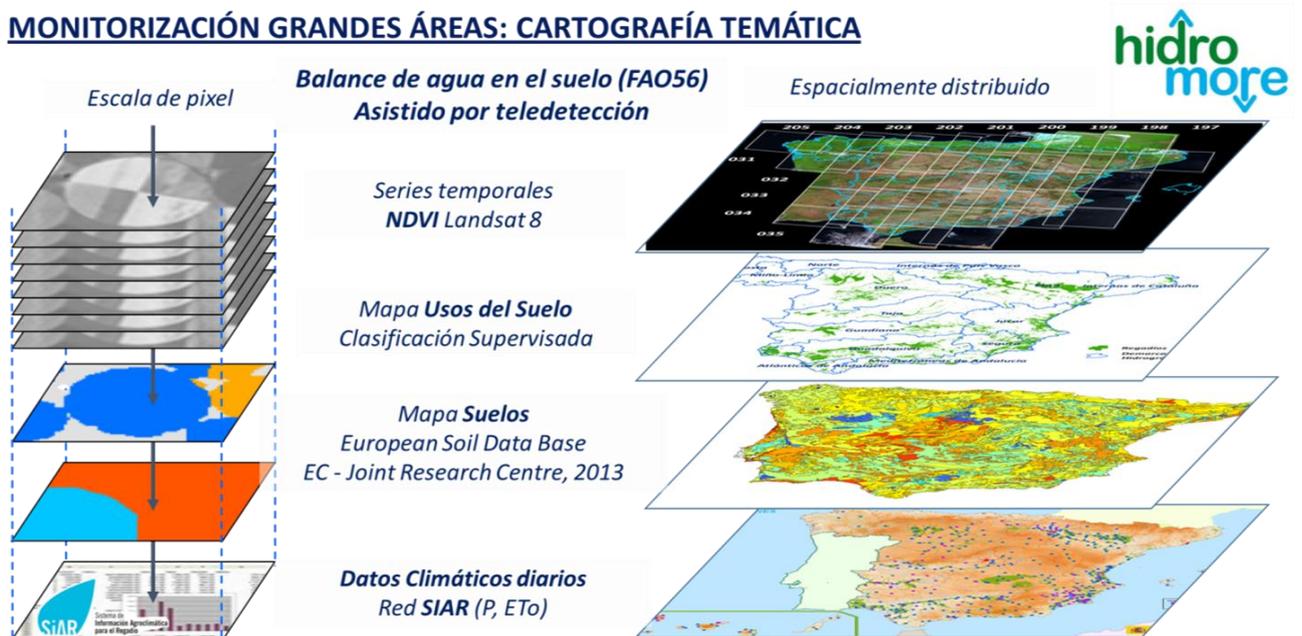
### 2.3. BALANCE DE AGUA EN EL SUELO MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN Y DE LA RED AGROCLIMATOLÓGICA SIAR.

Mediante la ejecución del balance de agua en el suelo asistido por teledetección se integra el procesado de imágenes de satélite que monitorizan las cubiertas vegetales en regadío y los datos registrados por las redes agroclimáticas centradas en las zonas de regadío, principalmente la red **SIAR**. En consecuencia, se han determinado espacial y temporalmente distribuidas (frecuencia mensual y anual), la evapotranspiración actual de los cultivos en regadío así como sus necesidades hídricas (demanda neta de los cultivos). La herramienta empleada para su ejecución es el programa libre **HidroMORE®** (<http://www.hidromore.es/>), desarrollado por la sección de teledetección y SIG del Instituto de Desarrollo Regional (UCLM).

**HidroMORE®** es un modelo operativo para la estimación de la recarga y la evapotranspiración que integra datos de satélite, meteorológicos, edáficos y de cultivo en el modelo de coeficiente dual FAO56 para la determinación de la evapotranspiración de los cultivos (ET) y sus necesidades hídricas (Torres, 2010). Así, **HidroMORE®** desarrolla a escala diaria y espacialmente distribuido el balance de agua asistido por teledetección (Figura 5). Por tanto, la extensión espacial de estudio se encuentra únicamente limitada por el tamaño de las

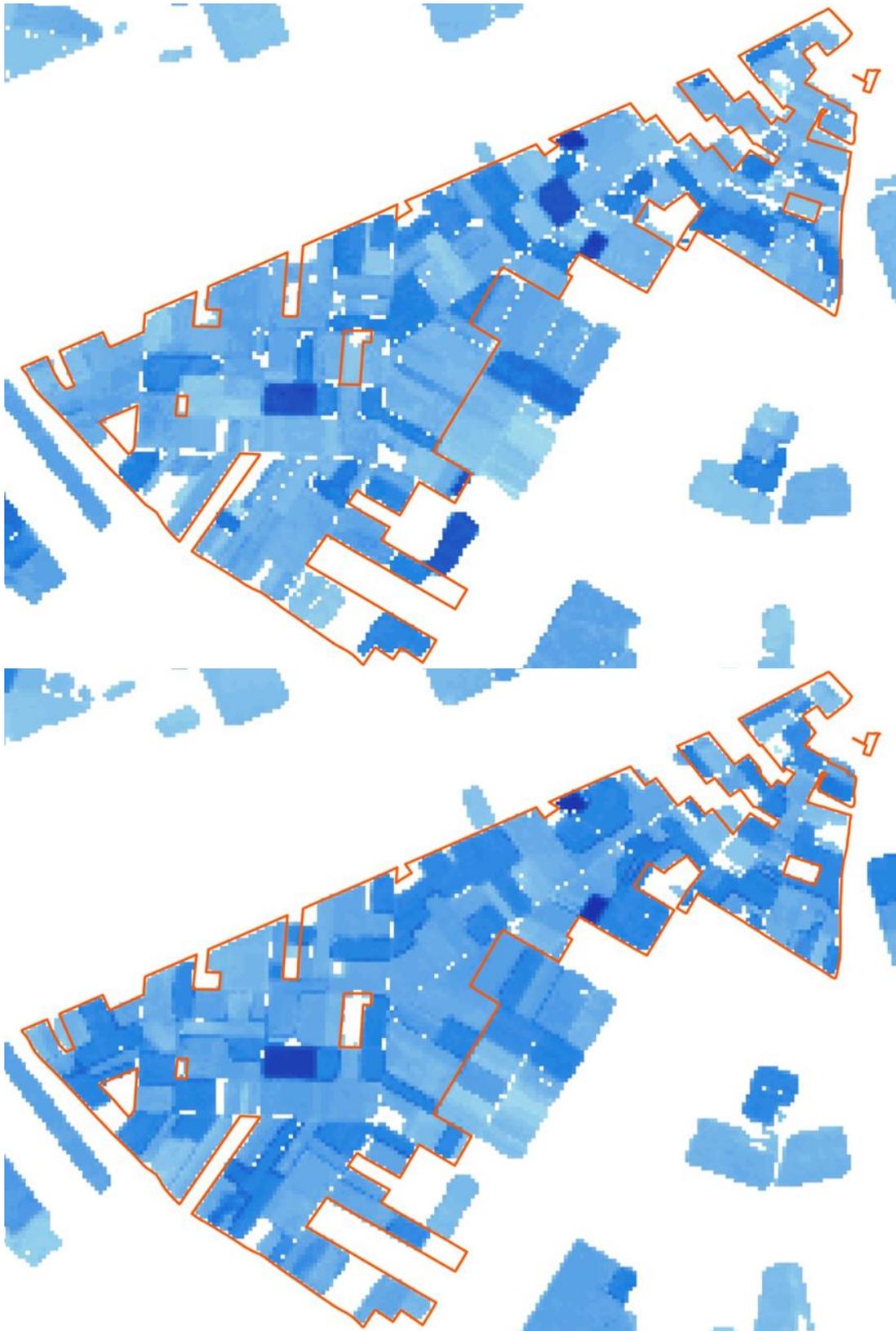
imágenes de satélite empleadas, mientras que la escala espacial estará en función de la resolución espacial de éstas imágenes. **HidroMORE®** presenta dos logros principales: la asimilación de datos multispectrales a través de las relaciones NDVI-Kcb y NDVI-fc; y la distribución espacial del modelo FAO56 (Torres, 2010). Es más, **HidroMORE®** ha sido aplicado de manera continua en campos diferentes, como su uso operativo para extender datos in-situ de sensores de humedad (Sánchez et al., 2010), como herramienta para modelizar la vegetación natural y los cultivos presentes en el Alto Guadiana (Calera et al., 2011; Calera et al., 2009a), para extender la metodología de los nuevos coeficientes de cultivo basal para viñas en regadío en el acuífero 08.29 (Mancha Oriental), así como extender la metodología de monitorización de cultivos de regadío y obtención de sus necesidades de riego en cuatro grandes cuencas españolas: Júcar, Guadiana, Segura y Tajo (Garrido-Rubio et al., 2012).

**MONITORIZACIÓN GRANDES ÁREAS: CARTOGRAFÍA TEMÁTICA**



**Figura 5.** Esquema metodológico del balance de agua en suelo asistido por teledetección espacial y temporalmente distribuido que desarrolla **HidroMORE®**

La generación de los mapas temáticos ETC y Riego, es de gran interés para diferentes usuarios del agua, especialmente aquellos gestores públicos encargados de desarrollar los planes hidrológicos de cuenca. Al obtener series temporales mensuales de la evaporación actual de los cultivos y de sus necesidades hídricas, tras incorporar las condiciones meteorológicas registradas por las redes agroclimáticas, se obtiene información más detallada de los recursos hídricos empleados. Es por tanto un camino que facilita el cumplimiento de la Directiva Marco Agua en relación el tercer informe en materia de aplicabilidad que se centra en contabilizar el volumen de agua como herramienta para un uso racional de la misma (European Commission, 2012). A continuación, la Figura 6 muestra dos detalles de dichos mapas temáticos centrados en una comunidad de riego de la demarcación hidrográfica del Júcar (S.A.T. San Martín de La Gineta).

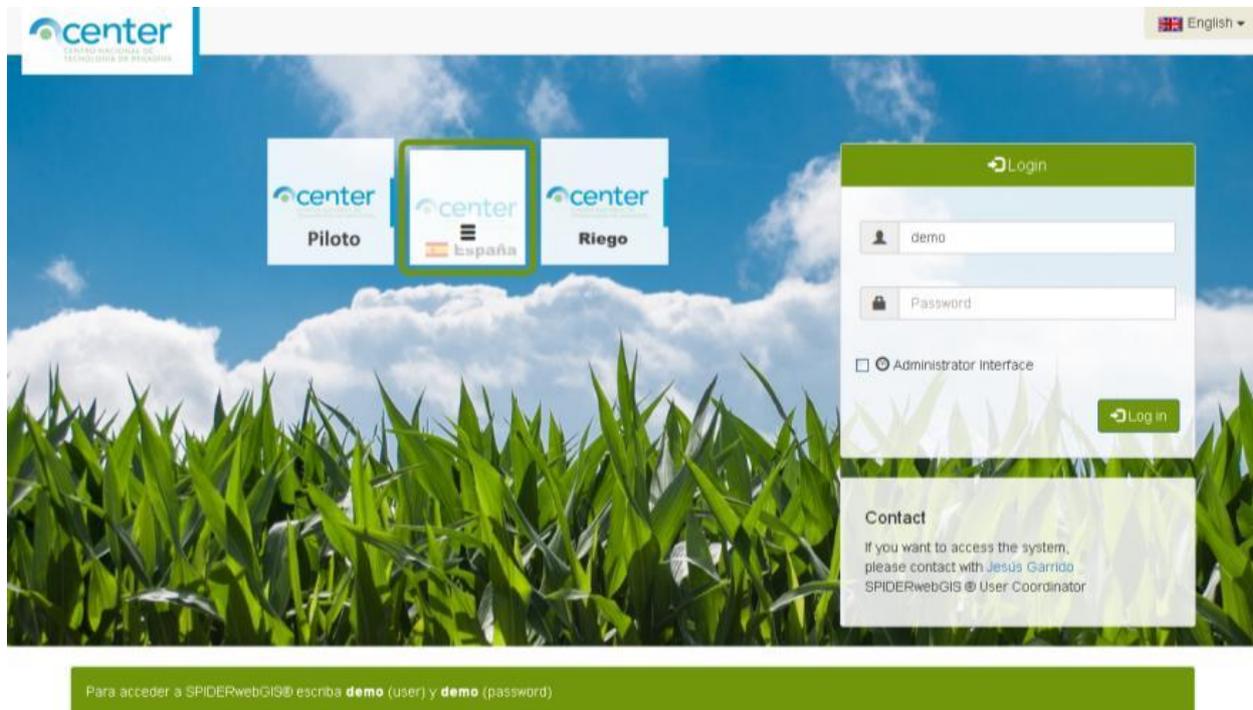


**Figura 6.** Detalle de los mapas temáticos tras ejecutar **HidroMORE®** con el resultado anual de evaporación actual de los cultivos y sus necesidades hídricas para una comunidad de regantes

## 2.4. DISTRIBUCIÓN DE LA INFORMACIÓN A TRAVÉS DEL SISTEMA SPIDERwebGIS®.

Todos estos productos anteriormente comentados han sido cargados en el sistema **SPIDERwebGIS®**. El sistema, de acceso libre y gratuito facilita a los diferentes usuarios del agua el estudio de las secuencias temporales de los diferentes productos generados en **SPIDER-CENTER**. Para tal fin, se ha creado una entrada personalizada (Figura 7), donde el usuario tan sólo debe incorporar el *login* demo y *password* demo.

En el punto 4 del presente documento el lector encontrará un resumen de todos los productos cargados. Además, el documento “Acceso a secuencias temporales de imágenes de satélite, superficies en regadío y su balance de agua en la España peninsular. Proyecto SPIDER-CENTER. Años 2014-2015” presenta un mayor detalle de información. Ésta y otra información relativa al proyecto pueden ser descargadas desde la misma web **SPIDER-CENTER**.



**Figura 7.** Aspecto de la web personalizada para el proyecto **SPIDER-CENTER** donde se han cargado los productos para su consulta libre y gratuita por los diferentes usuarios del agua

### **3. RESULTADOS DE LA MONITORIZACIÓN DE LAS SUPERFICIES AGRÍCOLAS REGADAS Y SUS NECESIDADES HÍDRICAS.**

Operando de la manera descrita en detalle en la Parte C (Metodología, Materiales y Resultados) de este documento se identifican las superficies en riego en cada año del estudio así como sus necesidades hídricas.

#### **3.1. RESULTADOS DE LAS SUPERFICIES AGRÍCOLAS REGADAS.**

Operando de la manera descrita en detalle en la Parte C se identifican las superficies en riego. En las siguientes tablas se muestran los resultados de usos del suelo por demarcación hidrográfica y año, así como el código empleado (ver Tabla 2).



**Tabla 3.** Superficie regada (ha) por usos y Demarcaciones hidrográficas en 2014.

Demarcación Hidrográfica	RP	RV	RPV	ROI	VR	OR	FC	FR	INV	TOTAL
Cantábrico Occidental	4	8	46	0	0	0	0	22	130	210
Cantábrico Oriental	0	2	1	0	0	0	0	11	85	99
Cuencas internas de Cataluña	10.146	19.314	14.987	208	11.829	8.443	884	22.889	696	89.396
Cuencas mediterráneas de Andalucía	7.674	3.557	6.265	2.958	312	24.701	20.834	14.806	38.801	119.908
Duero	143.026	230.794	107.096	14.342	15.423	795	0	1.880	161	513.517
Ebro	141.793	164.511	254.094	3.677	49.876	42.918	7.215	117.045	551	781.680
Galicia costa	6	105	729	2	4	0	0	0	78	924
Guadalete y Barbate	17.952	25.729	11.070	1.205	505	8.055	817	711	726	66.770
Guadalquivir	99.431	140.921	39.752	5.206	2.829	373.103	46.680	18.208	5.625	731.755
Guadiana	102.474	99.841	58.931	12.361	184.608	40.665	4.291	21.062	425	524.658
Júcar	48.598	39.831	32.847	4.148	36.810	15.027	162.469	25.511	1.563	366.804
Miño-Sil	1.391	1.955	7.024	33	3.953	0	0	1.015	13	15.384
Segura	24.939	4.620	46.539	8.406	21.976	12.133	50.955	47.294	14.098	230.960
Tajo	34.180	46.715	89.274	4.782	10.433	23.587	4	12.629	194	221.798
Tinto, Odiel y Piedras	6.415	549	1.318	185	54	3.044	12.528	2.658	4.743	31.494
<b>TOTAL</b>	<b>638.029</b>	<b>778.452</b>	<b>669.973</b>	<b>57.513</b>	<b>338.612</b>	<b>552.471</b>	<b>306.677</b>	<b>285.741</b>	<b>67.889</b>	<b>3.695.357</b>

**Tabla 4.** Superficie regada (ha) por usos y Demarcaciones hidrográficas en 2015.

Demarcación Hidrográfica	RP	RV	RPV	ROI	VR	OR	FC	FR	INV	TOTAL
Cantábrico Occidental	9	3.354	224	0	0	0	0	22	130	<b>3.739</b>
Cantábrico Oriental	0	540	21	0	0	0	0	11	85	<b>657</b>
Cuencas internas de Cataluña	7.002	15.485	20.092	71	11.829	8.443	884	22.889	696	<b>87.392</b>
Cuencas mediterráneas de Andalucía	9.650	3.749	6.497	1.988	312	24.701	20.834	14.806	38.801	<b>121.338</b>
Duero	236.347	202.514	101.069	2.020	15.423	795	0	1.880	161	<b>560.208</b>
Ebro	148.243	134.115	280.624	1.290	49.876	42.918	7.215	117.045	551	<b>781.876</b>
Galicia costa	6	205	505	0	4	0	0	0	78	<b>799</b>
Guadalete y Barbate	19.153	24.209	8.190	1.281	505	8.055	817	711	726	<b>63.648</b>
Guadalquivir	113.348	129.291	20.682	2.060	2.829	373.103	46.680	18.208	5.625	<b>711.825</b>
Guadiana	104.738	92.893	40.071	1.759	184.608	40.665	4.291	21.062	425	<b>490.512</b>
Júcar	52.041	45.449	25.878	4.138	36.810	15.027	162.469	25.511	1.563	<b>368.886</b>
Miño-sil	1.021	3.278	9.274	0	3.953	0	0	1.015	13	<b>18.554</b>
Segura	23.096	11.000	39.830	10.983	21.976	12.133	50.955	47.294	14.098	<b>231.364</b>
Tajo	57.296	50.056	48.295	1.143	10.433	23.587	4	12.629	194	<b>203.637</b>
Tinto, Odiel y Piedras	7.449	380	518	10	54	3.044	12.528	2.658	4.743	<b>31.384</b>
<b>TOTAL</b>	<b>779.398</b>	<b>716.517</b>	<b>601.769</b>	<b>26.744</b>	<b>338.612</b>	<b>552.470</b>	<b>306.677</b>	<b>285.741</b>	<b>67.890</b>	<b>3.675.819</b>

### 3.2. RESULTADOS DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS ESTIMADAS.

La identificación previa de las superficies en riego junto a la información meteorológica de la red SIAR (principalmente), ha permitido estimar las necesidades hídricas de riego que en la Tabla 5 se muestran agregadas por demarcaciones hidrográficas. Se presentan por tanto los resultados anuales de las necesidades netas de riego (sin tener en cuenta las diferentes eficiencias), obtenidas tras realizar con HidroMORE® el balance de agua en el suelo asistido por teledetección espacial y temporalmente distribuido. Además, en SPIDERwebGIS® se muestran las series temporales de necesidades de riego agregadas mensualmente.

**Tabla 5.** Superficie regada (ha) y volumen neto anual de riego (hm<sup>3</sup>/año) originado por demarcaciones hidrográficas en 2014 y 2015

Demarcación Hidrográfica	2014		2015	
	Superficie regada (ha)	Volumen de riego (hm <sup>3</sup> )	Superficie regada (ha)	Volumen de riego (hm <sup>3</sup> )
Cuenca Mediterránea Andaluza	73.758	270	79.629	321
Cuencas Internas de Cataluña	76.266	207	81.521	262
Duero	501.670	2.016	557.047	2.248
Ebro	724.822	3.253	762.429	3.698
Guadalete y Barbate	65.500	255	62.609	270
Guadalquivir	695.348	2.061	697.838	2.580
Guadiana	458.591	1.386	482.045	1.605
Júcar	323.741	1.341	352.725	1.212
Miño-Sil	15.067	53	18.390	79
Segura	172.020	713	196.249	778
Tajo	214.182	957	201.378	983
Tinto, Odiel y Piedras	24.713	82	25.197	110

## 4. ACCESO A LAS SECUENCIAS TEMPORALES DE IMÁGENES DE SATÉLITE Y SUS PRODUCTOS MEDIANTE EL SISTEMA SPIDERwebGIS®.

La consulta de los productos generados por el proyecto **SPIDER-CENTER** es libre y gratuita. Basta con seleccionar el grupo **SPIDER-CENTER España** y escribir la palabra *demo* en las casillas *Login* y *Password*. Los puntos de acceso al sistema **SPIDERwebGIS®** específicamente desarrollado en este proyecto son:

Web SPIDERwebGIS® (SPIDER-CENTER)	Web propia del CENTER
<a href="http://maps.spiderwebgis.org/login/?custom=spider-center">http://maps.spiderwebgis.org/login/?custom=spider-center</a>	<a href="http://www.center.es">http://www.center.es</a>

### 4.1. SECUENCIAS TEMPORALES DE IMÁGENES DE SATÉLITE.

- **RGB**: Secuencia temporal de imágenes combinación color.
- **NDVI**: Secuencia temporal de imágenes de índice de vegetación NDVI.
- **Kcb**: Secuencia temporal de imágenes coeficiente basal de cultivo sin nubes y sombras.

### 4.2. USOS DEL SUELO.

- **Usos del suelo [en regadío]**: Mapas descriptivos de usos de suelo en regadío clasificados según la secuencia temporal de NDVI. Divididos en diferentes clases según la leyenda:

	Regadíos de primavera		Leñosos en regadío
	Regadíos de verano		Olivar en regadío
	Regadíos de primavera y verano		Cítricos en regadío
	Regadíos de otoño e invierno		Frutales en regadío

### 4.3. MAPAS TEMÁTICOS DE VARIABLES AGROCLIMÁTICAS Y BALANCE DE AGUA EN SUELO.

- **Evapotranspiración actual [mm/mes]**: Secuencia temporal de imágenes que describen las necesidades hídricas acumuladas mensualmente de las cubiertas vegetales en regadío.
- **Necesidades netas de riego [mm/mes]**: Secuencia temporal de imágenes que describen la dosis de riego neto acumulado mensualmente de las cubiertas vegetales en regadío.

- **Evapotranspiración de referencia [mm/mes]:** Secuencia temporal de imágenes que describen la demanda evaporativa de la atmósfera acumulada mensualmente.
- **Precipitación [mm/mes]:** Secuencia temporal de imágenes que describen la precipitación acumulada mensualmente.

#### 4.4. CARTOGRAFÍA AUXILIAR.

- **Datos agrometeorológicos:** Capa vectorial de puntos que indica la posición de cada estación agroclimática que forma la Red SIAR, la red Meteocat y la red Euskalmet.
- **Delimitación escenas Landsat:** Capa vectorial de polígonos que muestra la extensión geográfica de las diferentes escenas Landsat 8 procesadas para SPIDER-CENTER.
- **SIGPAC (por provincias):** Capas vectoriales de polígonos que muestran los recintos SIGPAC (proporcionado por el FEGA). Visibles a partir de escalas superiores a 1:60.000.
- **Delimitación de cuencas hidrográficas:** Capa vectorial de polígonos que muestran la extensión geográfica de las diferentes demarcaciones hidrográficas.
- **Zonas regables (MAGRAMA):** Capa vectorial de polígonos (en revisión) que muestra las zonas regables. Visibles a partir de escalas superiores a 1:2.000.000.
- **Delimitación administrativa provincial:** Capa vectorial de polígonos que muestra la las diferentes provincias
- **API de Google®:** Muestra las capas cartográficas Roadmap, Satellite y Terrain del sistema web Google Maps® (Application Programming Interface).

En la Parte B de este informe se adjunta información más detallada del contenido del grupo **SPIDER-CENTER España**, con acceso a secuencias temporales de imágenes de satélite y sus productos, e instrucciones de manejo del sistema.

## 5. DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO SPIDER-CENTER ESPAÑA

A lo largo del proyecto **SPIDER-CENTER** se han llevado a cabo trabajos de presentación y difusión de los resultados obtenidos. Dichos trabajos han tenido lugar en diferentes escenarios, lo que ha permitido llegar a un público diferente según cada uno de ellos.

### 5.1. XVI CONGRESO DE LA ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE TELEDETECCIÓN (Sevilla, 2015)

El 22 de octubre de 2015, en el congreso de la Asociación Española de Teledetección (AET), se llevó a cabo la ponencia oral “Integración de series temporales de imágenes de satélite y red agroclimática **SIAR** para la monitorización de superficies de riego en la península Ibérica”. Dicha presentación permitió exponer la metodología y resultados del proyecto frente a un público especializado en asuntos propios de la teledetección. La presentación desarrollada se puede descargar de la web del sistema **SPIDERwebGIS®** como material de consulta (<http://maps.spiderwebgis.org/login/?custom=spider-center>).

### 5.2. JORNADA TÉCNICA DE INNOVACIÓN EN GESTIÓN DEL REGADÍO MEDIANTE REDES AGROCLIMÁTICAS, TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN. (Madrid, 2015).

El 18 de noviembre de 2015, en las Jornadas “Innovación en gestión de regadío mediante redes agroclimáticas, teledetección y sistemas de información” celebradas en el CENTER, se llevó a cabo la presentación “Proyecto: SPIDER-CENTER 2014 – 2015. Acceso a secuencias temporales de imágenes de satélite, superficies en regadío y su balance de agua en la España peninsular”. Dicha presentación permitió exponer la metodología y resultados del proyecto frente a un público con experiencia en el mundo agrícola del regadío formado por empresas, regantes privados e instituciones públicas. La presentación desarrollada se puede descargar de la web del sistema **SPIDERwebGIS®** como material de consulta (<http://maps.spiderwebgis.org/login/?custom=spider-center>).

### 5.3. XXVI JORNADAS DE PARALELISMO (Córdoba, 2015).

El 24 de septiembre de 2015, en las “XXVI Edición de las Jornadas de paralelismo”, se llevó a cabo la presentación “**HidroMORE 2**: Una versión paralela y optimizada de **HidroMORE**”. Dicha presentación permitió exponer los avances que el proyecto **SPIDER-CENTER** permitió realizar en la paralelización y optimización del software libre **HidroMORE®** empleado para llevar a cabo el balance de agua en el suelo asistido por teledetección sobre la península Ibérica. El público asistente, especializado en informática, pudo juzgar los avances realizados en dicha dirección. La presentación desarrollada puede descargarse de la propia web de dicho congreso (<http://www.jornadassarteco.org/>).

## 6. EJEMPLOS DE MONITORIZACIÓN EN PARCELA OBSERVADOS EN SPIDER-CENTER ESPAÑA

En esta sección ofrecemos ejemplos de monitorización de cultivos a escala de parcela usando el sistema **SPIDERwebGIS®**, lo que puede reproducirse en cualquier punto de la superficie terrestre de la España peninsular. Así, mostramos a continuación los siguientes ejemplos:

- Monitorización de una parcela cultivada con maíz en regadío
- Monitorización en el delta del Ebro de múltiples parcelas cultivadas con arroz y dos pivots cultivados en anillos
- Monitorización de las crecidas del Ebro a su paso por Zaragoza.

### 6.1. MAÍZ EN REGADÍO, COMUNIDAD DE USUARIOS INGENIERO EUGENIO OLID, CÁDIZ.

Al pedir información al sistema sobre un área de aproximadamente 1ha, tomada sobre una parcela de maíz (círculo rojo, Figura 8), este permite desplegar tanto imagen como valores numéricos de un índice denominado NDVI, que describe la actividad fotosintética de la cubierta vegetal, ver detalles en Parte B. En la Figura 8, la serie temporal NDVI (puntos azules oscuros) permite observar cómo evoluciona la cubierta a lo largo del tiempo, mostrando cómo crece dicha cubierta y describiendo el ciclo característico de crecimiento del maíz. Además, se muestran los valores del coeficiente de cultivo basal, Kcb, (puntos azules) que permiten calcular, junto a la información meteorológica dada por la red **SIAR**, el consumo de agua de la cubierta vegetal del maíz en este punto de la parcela a lo largo de su ciclo de crecimiento.

Las imágenes corresponden a cuatro momentos seleccionados (ver fechas). Sin embargo por cada uno de los puntos mostrados en la gráfica, que corresponden a una imagen adquirida, podría visualizarse la imagen correspondiente

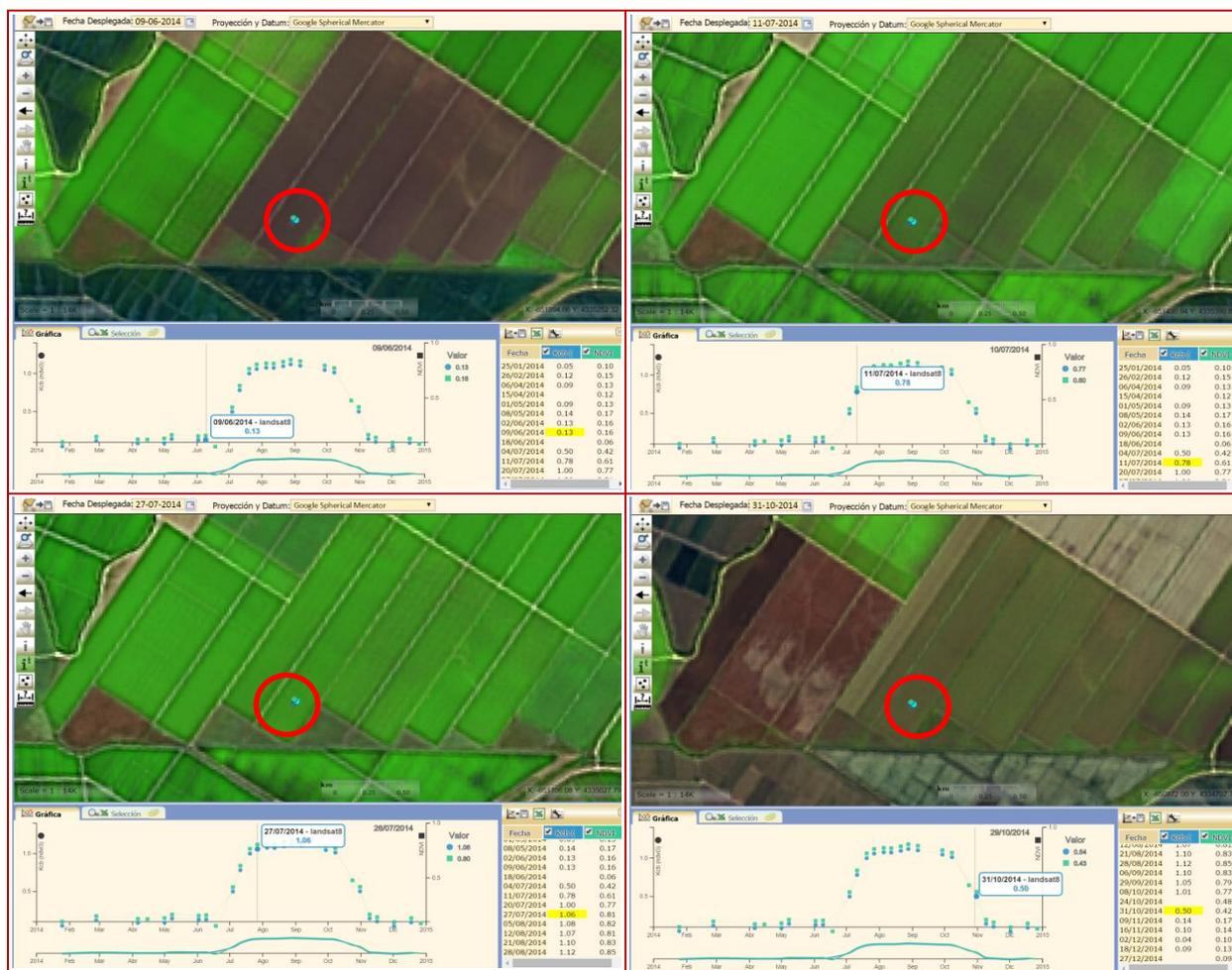
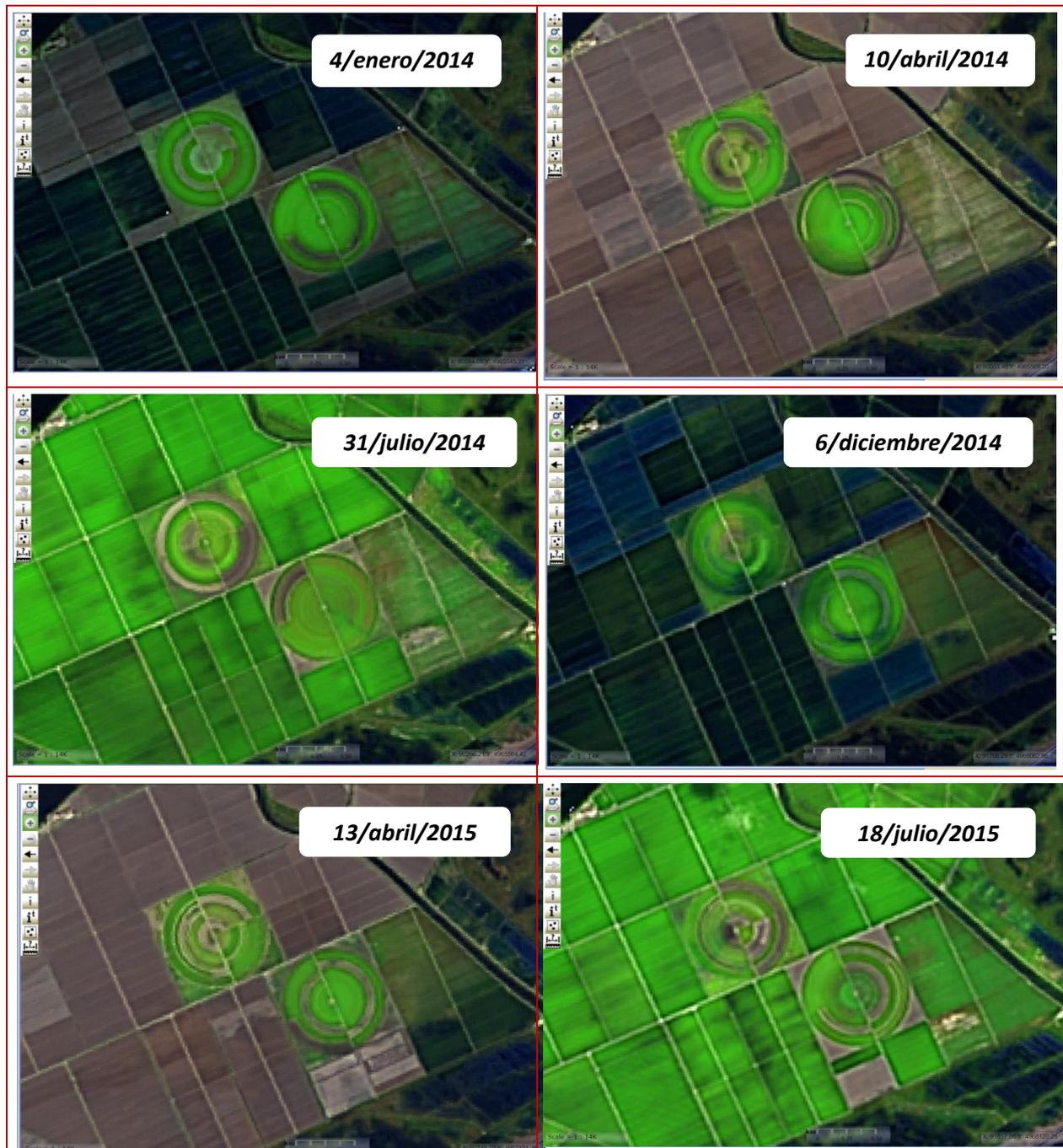


Figura 8. Evolución del NDVI y su Kcb consultado en SPIDER-CENTER sobre una parcela de maíz.

## 6.2. CULTIVO DEL ARRÓZ Y PÍVOT CULTIVADO EN ANILLOS EN EL DELTA DEL EBRO

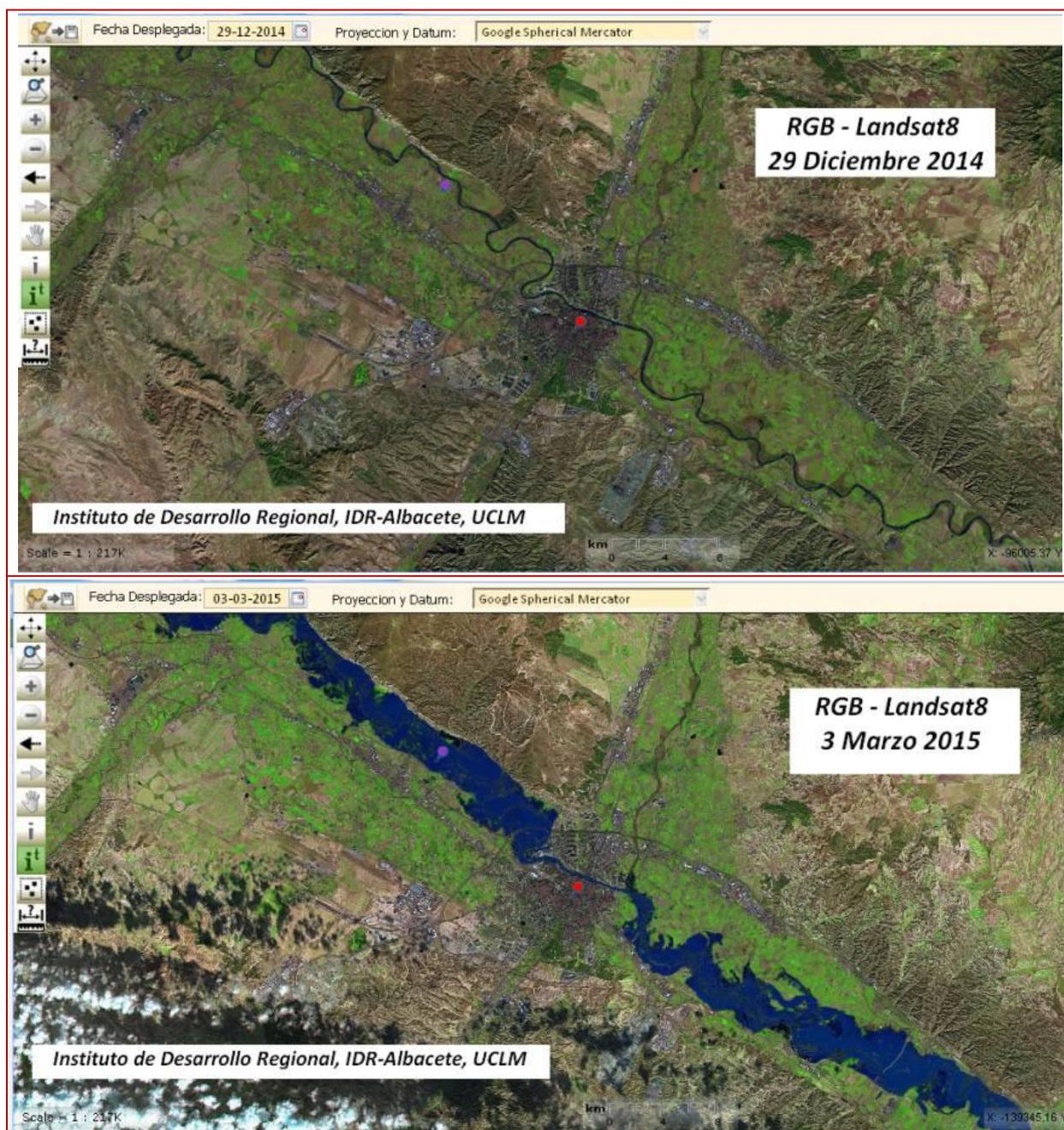
A continuación se muestra una serie temporal de imágenes RGB donde se aprecia la inundación, secado y desarrollo del cultivo de arroz durante las campañas de verano 2014 y 2015, así como dos pivots cultivados en anillos de forma sorprendente en el Delta del Ebro.



**Figura 9.** Secuencia de imágenes RGB visualizadas en SPIDER-CENTER sobre cultivos de arroz y pivot manejado en anillos sobre el Delta del Ebro

### 6.3. CRECIDA DEL RÍO EBRO

Durante el invierno de 2014/2015 las inundaciones producidas por la crecida del río Ebro anegaron una gran parte de parcelas agrícolas asentadas en su ribera. El satélite Landsat 8 capturó dos imágenes abajo mostradas en donde se aprecia los efectos producidos por tal crecida.



**Figura 10.** Comparación de la inundación de campos de cultivo que limitan con el río Ebro a su paso por Zaragoza mediante imágenes RGB visualizadas en **SPIDER-CENTER**.



**INNOVACIÓN EN EL REGADÍO**  
**UN USO MÁS EFICIENTE DEL AGUA INTEGRANDO**  
**RED SIAR, TELEDETECCIÓN Y SIG**  
**Proyecto SPIDER-CENTER**  
**2014 – 2015**

**PARTE B. CÓMO USAR LA**  
**INFORMACIÓN PRESENTADA EN EL**  
**SISTEMA SPIDERwebGIS® PARA**  
**DETERMINAR LAS NECESIDADES DE**  
**AGUA Y RIEGO**



## 1. ACCESO A SECUENCIAS TEMPORALES DE IMÁGENES DE SATÉLITE, SUPERFICIES EN REGADÍO SU BALANCE DE AGUA EN LA ESPAÑA PENINSULAR. PROYECTO WEBGIS SPIDER-CENTER. AÑOS 2014-2015

Alfonso Calera y Jesús Garrido-Rubio  
Sección de Teledetección y SIG. Universidad de Castilla La Mancha.  
[Alfonso.Calera@uclm.es](mailto:Alfonso.Calera@uclm.es)

### 1.1. INTRODUCCIÓN Y ACCESO AL SISTEMA

La Subdirección General de Regadíos y Economía del agua (SGRYEA), del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA), a través de Centro Nacional de Tecnología de Regadíos (CENTER), ha puesto en marcha el proyecto SPIDER-CENTER, realizado por la Sección de Teledetección y SIG (Instituto de Desarrollo Regional, Albacete, Universidad de Castilla-La Mancha).

Este proyecto utiliza secuencias temporales de imágenes de satélite para monitorizar los cultivos y realizar el seguimiento de sus necesidades hídricas, específicamente los cultivos en regadío, en el ámbito espacial de la España peninsular. El fin último de este proyecto es contribuir a la mejora en la eficiencia en el uso del agua de regadío, y para ello tiene entre sus metas poner a disposición de múltiples usuarios la información generada.

La herramienta SPIDERwebGIS® permite acceder vía web a las secuencias temporales de imágenes de satélite y a productos derivados de ellas tales como las superficies de regadío y el balance de agua realizado sobre estas superficies, en toda la España peninsular, a alta resolución espacial (30 m x 30 m), para los años 2014 y 2015.

La consulta de los productos generados por el proyecto SPIDER-CENTER es libre. Basta con seleccionar el grupo **SPIDER-CENTER España** y escribir la palabra **demo** en las casillas *Login* y *Password* que el usuario encontrará en alguno de los dos puntos de acceso vía web del sistema SPIDERwebGIS®:

<b>Web SPIDERwebGIS® (SPIDER-CENTER)</b>	<b>Web<sup>(1)</sup> propia del CENTER</b>
<a href="http://zeus.idr-ab.uclm.es/publico/webgis/">http://zeus.idr-ab.uclm.es/publico/webgis/</a>	<a href="http://www.center.es">www.center.es</a>

<sup>(1)</sup> Sección Nuevas Aplicaciones Tecnológicas

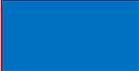
## 1.2. PRODUCTOS DISPONIBLES

### 1.2.1. Secuencia de imágenes de satélite

- **RGB:** Contiene la secuencia temporal de imágenes combinación color Landsat 8 a un tamaño de píxel de 15m para toda la España peninsular, y la secuencia de imágenes combinación color Spot5 a un tamaño de píxel de 10 m en las zonas de Barrax (Albacete), Albufera (Valencia), CENTER (Madrid) y Figueras (Gerona).
- **NDVI:** Contiene la secuencia temporal de imágenes NDVI Landsat 8 a un tamaño de píxel de 30m para toda la España peninsular, y la secuencia de imágenes NDVI Spot5 a un tamaño de píxel de 10 m ( idénticas zonas que en imágenes RGB). Todas las imágenes NDVI están normalizadas, y presentan valores típicos de NDVI para suelo desnudo de 0.14, y valor típicos de NDVI de 0.91 para vegetación verde muy densa.
- **Kcb:** Secuencia de imágenes obtenidas directamente desde imágenes NDVI tras un filtrado que elimina nubes y sombras. El tamaño de píxel es de 30m. Presentan valores típicos para suelo desnudo de 0.15 y valores típicos de 1.15 para la vegetación verde muy densa.

### 1.2.2. Usos de suelo

- **Usos del suelo [en regadío]:** Mapas descriptivos de usos de suelo del regadío clasificados según la secuencia temporal del NDVI y están centrados en las zonas regables de la España peninsular. Existen dos mapas según el año de estudio 2014 o 2015. Los mapas están divididos en las siguientes clases y representados en SPIDERwebGIS® según la siguiente leyenda:

	Regadíos de primavera		Leñosos en regadío
	Regadíos de verano		Olivar en regadío
	Regadíos de primavera y verano		Cítricos en regadío
	Regadíos de otoño e invierno		Frutales en regadío

### 1.2.3. Cartografía temática de variables agroclimáticas y del balance de agua en suelo

- **Evapotranspiración actual [mm/mes]:** Secuencia temporal de imágenes a periodicidad mensual. Representan las necesidades hídricas acumuladas mensualmente de las cubiertas vegetales en regadío. Tienen un tamaño de píxel de 30m.
- **Necesidades de riego [mm/mes]:** Secuencia temporal de imágenes a periodicidad mensual. Representan las necesidades netas de riego acumuladas mensualmente de las cubiertas vegetales en regadío. Tienen un tamaño de píxel de 30m.
- **Evapotranspiración de referencia [mm/mes]:** Secuencia temporal de imágenes a periodicidad mensual. Representan la demanda evaporativa de la atmósfera acumulada mensualmente. Están basadas en datos diarios recogidos principalmente por la Red SIAR. Tienen un tamaño de píxel de 30m.
- **Precipitación [mm/mes]:** Secuencia temporal de imágenes a periodicidad mensual. Representan la precipitación acumulada mensualmente. Están basadas en datos diarios recogidos principalmente por la Red SIAR. Tienen un tamaño de píxel de 30m.

### 1.2.4. Cartografía auxiliar

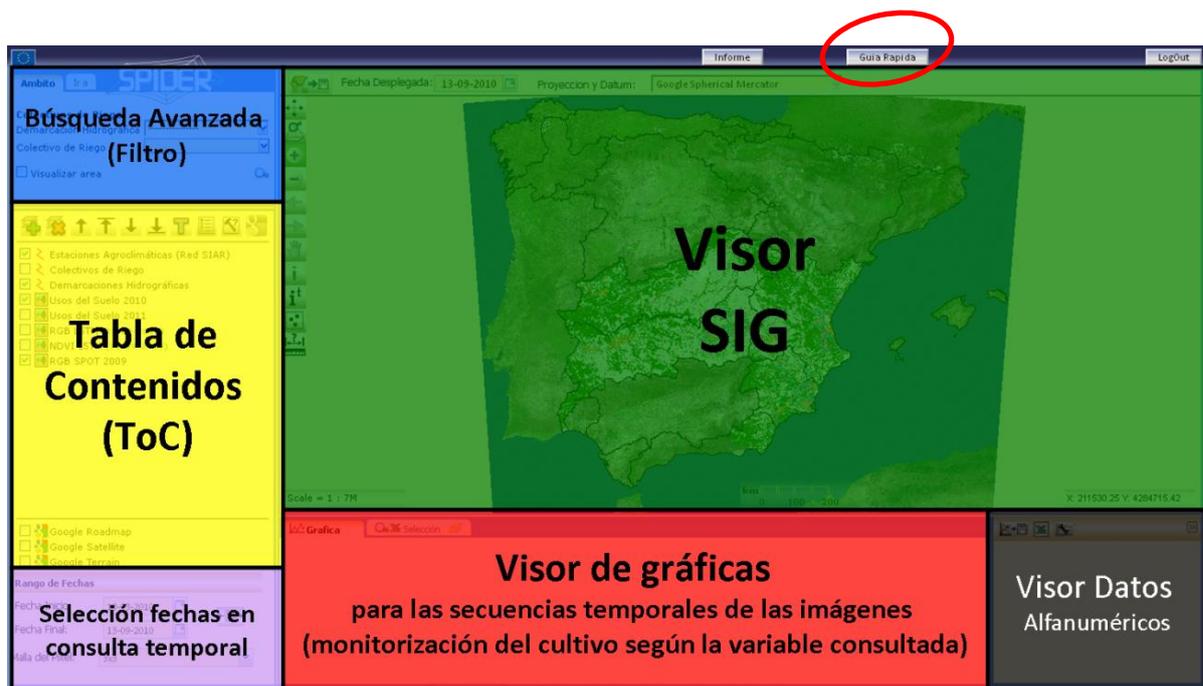
- **Datos agrometeorológicos:** Capa vectorial de puntos que indica la posición de cada estación agroclimática que forma la Red SIAR, la red Meteocat y la red Euskalmet. Su consulta muestra el código y nombre de la estación seleccionada.
- **Delimitación escenas Landsat:** Capa vectorial de polígonos que muestra la extensión geográfica de las diferentes escenas Landsat 8 procesadas para SPIDER-CENTER. Su consulta muestra el código de la escena consultada.
- **SIGPAC (por provincias):** Capas vectoriales de polígonos que muestran los recintos SIGPAC (proporcionado por el FEGA). Visibles a partir de escalas superiores a 1:60.000. Organizadas por provincias, su consulta muestra la provincia, municipio, agregado, zona, polígono, parcela, recinto, pendiente, coeficiente de regadío y uso SIGPAC del polígono seleccionado.
- **Delimitación de cuencas hidrográficas:** Capa vectorial de polígonos que muestran la extensión geográfica de las diferentes demarcaciones hidrográficas. Obtenidas desde la propia cartografía de cada Confederación Hidrográfica. Su consulta muestra el nombre de la demarcación seleccionada.
- **Zonas regables (MAGRAMA):** Capa vectorial de polígonos (en revisión) que muestra las zonas regables de la España peninsular. Visibles a partir de escalas

superiores a 1:2.000.000. Su consulta muestra el nombre, superficie de la comunidad de regantes o zona regable consultada.

- **Delimitación administrativa provincial:** Capa vectorial de polígonos que muestra la extensión geográfica de las diferentes provincias de la España peninsular. Obtenidas desde la cartografía del Instituto Geográfico Nacional. Su consulta muestra el nombre de la provincia seleccionada.
- **API de Google®:** Muestra las capas cartográficas *Roadmap*, *Satellite* y *Terrain* del sistema web Google Maps® (*Application Programming Interface*).

### 1.3. MANUAL DE USO

El manual de uso para SPIDERwebGIS® se descarga desde el botón “*Guía Rápida*” una vez accede el usuario al sistema. La siguiente figura muestra la localización de dicho botón (círculo rojo), y una breve descripción de la estructura del visor WebSIG.



## 2. GUÍA RÁPIDA DEL USUARIO

**Secuencias temporales de imágenes de satélite para el manejo agronómico. Introducción al uso del sistema WebSIG SPIDER-CENTER España**



1

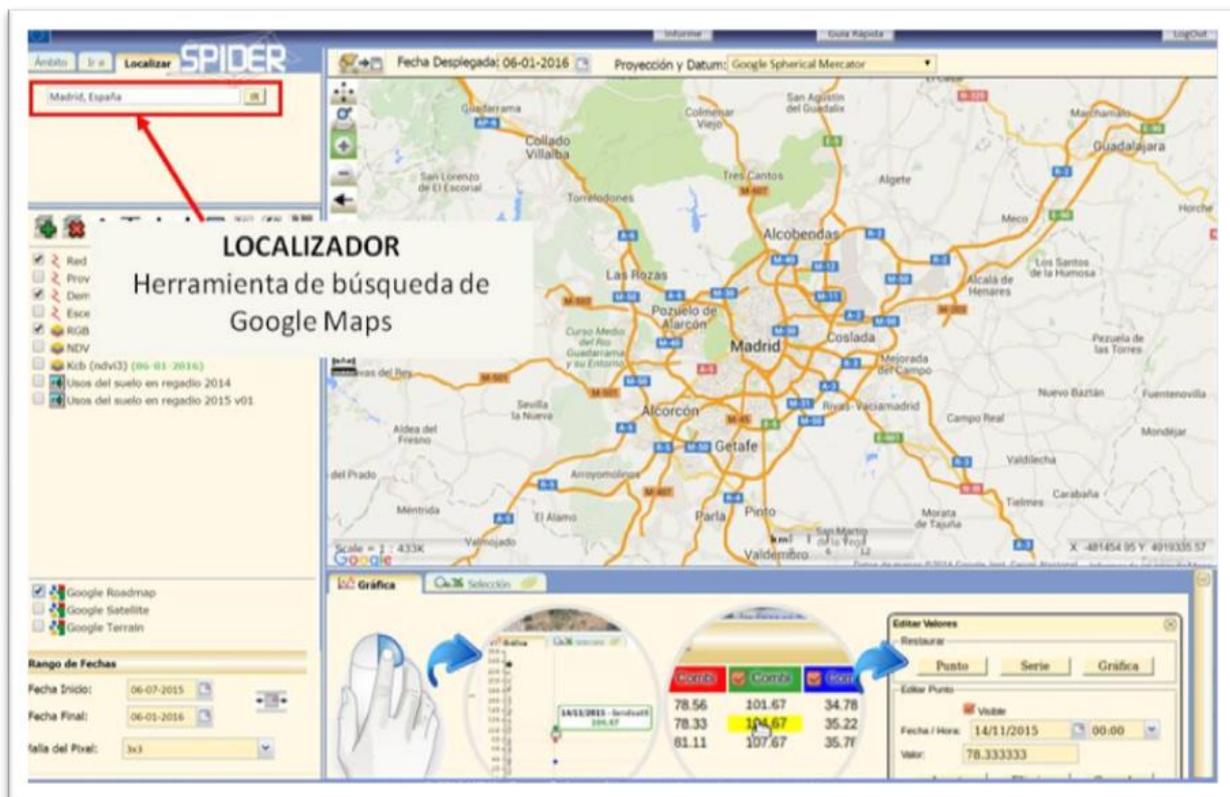


1. Al sistema se accede desde el portal **WebSIG SPIDER** con la siguiente dirección:  
<http://maps.spiderwebgis.org/webgis/>
2. A continuación se selecciona el grupo SPIDER-CENTER España
3. Y se introduce el usuario **demo** y contraseña **demo**

Para acceder a SPIDERwebGIS® escriba **demo** (user) y **demo** (password)

La Subdirección General de Regadíos y Economía del agua (SGRYEA), del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA), a través de Centro Nacional de Tecnología de Regadíos (CENTER), ha puesto en marcha el proyecto SPIDER-CENTER, realizado por la Sección de Teledetección y SIG (Instituto de Desarrollo Regional, Albacete, Universidad de Castilla-La Mancha).

2



### Acceso a la secuencia de imágenes de satélite disponibles y consulta de valores de NDVI



1. Al seleccionar la leyenda de la capa NDVI (clic sobre ella) se colorea de azul, y queda activada para consultas.

2. Seleccionar la herramienta de consulta temporal (i) y con el cursor elegir el punto del mapa que se quiera consultar, pulsando el botón izquierdo del ratón. Automáticamente, en la parte inferior de la pantalla se desplegará una gráfica con los valores de NDVI disponibles correspondientes a ese punto; por defecto la serie temporal abarca los últimos seis meses, pudiéndose modificar a necesidad del usuario.



Listado de provincias a seleccionar si se desea para hacer zoom en el visor.

En la parte superior del mapa figura la fecha de la imagen que se está visualizando.

Listado de capas disponibles. Usar el icono de la cruz verde para cargar más capas

Pueden elegirse las capas de "Google Satellite" como mapa base para orientación del usuario

Para ampliar información sobre conceptos que ayudan a la interpretación de las imágenes consultar el apartado final: "Algunos Conceptos Básicos".

### Acceso a la secuencia de imágenes de satélite disponibles y consulta de valores de NDVI



La imagen se puede visualizar en formato "combinación de color" (que muestra tonalidades "rgb" como suelo desnudo en marrón y vegetación en tonalidades de verde); o bien en un escala NDVI, que muestra un abanico de colores en función de intervalos de valor del NDVI. Para activar o desactivar cada una de estas opciones, seleccionar la casilla a la izquierda del nombre de la capa.



### Captura de Mapas georeferenciados

1. Herramienta de captura de mapas: al seleccionar aparecerá la siguiente ventana.

2. Si seleccionamos la casilla "Dimensiones del visor", capturaremos exactamente lo que esta mostrando el visor en el momento, de lo contrario capturaremos por defecto 400x400 pixeles.

3. Si seleccionamos la casilla "Imagen Georreferenciada", capturaremos la imagen en formato TIF georeferenciada, en el sistema de proyección que estemos utilizando en el visor en ese momento, de lo contrario capturaremos el mapa en formato JPG sin georeferenciar.

Obsérvese el aspecto distinto de la imagen al seleccionar el modo de visualización en NDVI. Alternando entre los distintos modos de visualización pueden apreciarse distintos detalles del estado de la vegetación.

Los valores del intervalo de NDVI a que corresponde cada color pueden consultarse actuando sobre el icono "leyenda".

"Consulta multigráfica": se representan los valores de NDVI para los distintos puntos seleccionados en la imagen, quedando identificados por el mismo color.

## ALGUNOS CONCEPTOS BÁSICOS

- Las imágenes del satélite corresponde a observaciones verticales sobre el terreno.
- “Combinación color”: es la representación gráfica de la imagen del satélite, convenientemente procesada, y representada en tonalidades de color RGB; las diferencias de color se corresponden con valores distintos del índice NDVI.
- NDVI (Índice de Vegetación Diferencial Normalizado): representa el tamaño y la capacidad fotosintética de la cubierta vegetal. Algunos valores de referencia:
  - Suelo desnudo: 0,15.
  - Máxima cobertura verde: 0,91.
- Representaciones gráficas de la evolución temporal del NDVI: caracterizan el desarrollo y crecimiento de la cubierta vegetal y orientan sobre su potencial productivo y potencial de transpiración. Cada cultivo responde a una curva característica tipo.

9

### 3. DETERMINACIÓN DE LAS NECESIDADES DE AGUA Y DE RIEGO MEDIANTE ESTACIONES METEOROLÓGICAS Y SERIES TEMPORALES DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES

Alfonso Calera, Isidro Campos y Jesús Garrido-Rubio  
Sección de Teledetección y SIG. Universidad de Castilla La Mancha.  
[Alfonso.Calera@uclm.es](mailto:Alfonso.Calera@uclm.es)

#### 3.1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La gestión adecuada del riego requiere la estimación precisa de las demandas hídricas de los cultivos y la adecuación de los volúmenes de riego a las mismas para conseguir el mejor uso del agua desde el punto de vista productivo y medioambiental. Para ello han de considerarse las características específicas de manejo de cada cultivo, los aportes por precipitación y el contenido de agua en la capa de suelo explorado por las raíces.

En este documento<sup>1</sup> se considera la estimación de las necesidades de agua y de riego mediante secuencias temporales de imágenes multiespectrales de satélite y estaciones meteorológicas; se describe también el procedimiento para estimar las necesidades de agua y riego mediante la integración de las series de imágenes en el modelo FAO56. Dadas las diferentes características de cultivo y manejo, se analiza la aplicación del procedimiento descrito por separado a cultivos herbáceos y leñosos, y dentro de estos últimos específicamente a la viña, y se discute su aplicabilidad. Así pues el documento se estructura con una parte metodológica general a todo tipo de cultivos y cubiertas, y una parte específica para cultivos herbáceos y para cultivos leñosos donde se describen aproximaciones operativas.

#### 3.2. DETERMINACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS: METODOLOGÍA KC-ETO BASADA EN TELEDETECCIÓN

Una metodología ampliamente utilizada y comúnmente aceptada para la estimación de las necesidades de agua de la cubierta vegetal, que vienen determinadas por la evapotranspiración ET, es aquella denominada Coeficiente de cultivo-Evapotranspiración de referencia  $K_c-ET_0$ , que se describe de forma detallada en el manual de FAO (Allen et al., 1998a).

El procedimiento  $K_c-ET_0$  considera que la ET es el producto de dos factores, el primero de ellos la demanda evaporativa de la atmósfera o evapotranspiración de referencia,  $ET_0$ , en la que se

---

<sup>1</sup> Actualización del documento del mismo título presentado en la Jornada celebrada en el CENTER en Septiembre de 2014

engloban parámetros meteorológicos como la radiación, la velocidad del viento y la sequedad del aire, y el segundo, un coeficiente de cultivo, que indica el estado de desarrollo de la cubierta frente a aquella que se considera patrón o de referencia, en FAO56 una gramínea como la festuca.

La formulación más avanzada del procedimiento FAO56 incorpora al tradicional uso de coeficiente de cultivo “único”  $K_c$  el denominado coeficiente de cultivo “dual” (Wright, 1982), el cual permite acercarnos a la estimación de la evapotranspiración como suma por un lado de la transpiración, o flujo de agua a través de la planta, y por otro de la evaporación desde la fracción de suelo desnuda. Para ello se introduce el coeficiente de cultivo basal,  $K_{cb}$ , como el cociente entre la transpiración de una cubierta en ausencia de estrés y la evapotranspiración de referencia, así como un coeficiente evaporativo,  $K_e$ , que recoge la evaporación desde el suelo desnudo.

La estimación de la ET para cultivos en ausencia de estrés hídrico se realiza mediante las ecuaciones (1) y (2) usando el coeficiente único y dual, respectivamente:

- 1)  $ET = K_c ET_o$
- 2)  $ET = K_{cb} ET_o + K_e ET_o$

donde:

*ET: evapotranspiración del cultivo*

*ET<sub>o</sub>: evapotranspiración de referencia*

*K<sub>c</sub>: coeficiente de cultivo “único”*

*K<sub>cb</sub>: coeficiente de cultivo basal o coeficiente de transpiración*

*K<sub>cb</sub> · ET<sub>o</sub> es la componente de la transpiración en ausencia de estrés*

*K<sub>e</sub>: coeficiente evaporativo*

*K<sub>e</sub> · ET<sub>o</sub> es la componente de evaporación desde el suelo*

La disponibilidad de agua en el suelo suele ser el factor limitante en el desarrollo de la cubierta vegetal en condiciones semiáridas típicas del clima mediterráneo. Cuando el contenido en agua de la capa de suelo explorada por las raíces cae por debajo de un cierto valor umbral, la planta no puede extraer agua al ritmo que demanda el sistema planta-atmósfera, y entra en estrés hídrico. La aparición de estrés hídrico causa diferentes efectos sobre el desarrollo de las plantas: valores bajos de estrés causan disminución del crecimiento vegetativo, lo que se traduce en un menor crecimiento y desarrollo de las hojas. Grados de estrés más elevado causan cierre estomático y si el grado de estrés crece, las hojas pueden morir.

El efecto del estrés hídrico en la metodología  $K_c$ - $ET_o$  se considera introduciendo un coeficiente de estrés  $K_s$ , tal y como se indica en la ecuación (3). Este coeficiente  $K_s$  puede tomar valores en el rango de 0 a 1; Un valor de  $K_s$  igual a 1 indica ausencia de estrés, y en este caso la ecuación (3) se transforma en la ecuación (2); mientras que un valor igual a 0 para  $K_s$  corresponde a máximo estrés.

- 3)  $ET = K_s K_{cb} ET_o + K_e ET_o$

En el caso de utilizar el coeficiente único  $K_c$ , el coeficiente de estrés se introduce en la formulación FAO56 como se muestra en la ecuación (4).

$$4) \quad ET = K_s K_c ET_o$$

Las ecuaciones (3) y (4) se transforman en las ecuaciones (1) y (2) en el caso de ausencia de estrés, esto es  $K_s = 1$ . El cálculo del coeficiente de estrés  $K_s$  se hace en FAO56 estimando el contenido de agua de la capa de suelo en la que se encuentran las raíces a través de un balance de agua, tal y como se describe en el Anexo I. La determinación del estrés hídrico permite el uso de técnicas de riego como las denominadas de riego deficitario controlado, en las que se aplica la cantidad de agua precisa que permite un manejo del cultivo bajo un determinado estrés sin merma apreciable en la producción.

### **3.2.1. El coeficiente de cultivo basal $K_{cb}$ desde imágenes multiespectrales: El modelo FAO56 basado en Teledetección**

Para obtener el valor de  $ET_o$  se dispone en España de una red de estaciones agroclimáticas que permiten conocer de manera precisa y en tiempo real su valor diario, calculado a partir de datos meteorológicos medidos en la zona y públicamente disponibles mediante el Sistema de información Agroclimática para el Regadío (SIAR),

<http://eportal.magrama.gob.es/websiar/Inicio.aspx>.

La determinación del coeficiente de cultivo  $K_c$  es el segundo paso para calcular la ET. El parámetro  $K_c$  varía a lo largo del ciclo de crecimiento y depende del desarrollo concreto de cada cubierta.

Aunque en las últimas décadas se ha realizado un gran esfuerzo para tabular valores típicos del coeficiente de cultivo y del coeficiente de cultivo basal, estos dependen fuertemente de la arquitectura de la cubierta y de la cobertura vegetal alcanzada. Su determinación concreta es a veces compleja y requiere de un intensivo y costoso trabajo de campo por lo que limita la aplicación generalizada del modelo FAO56.

En el marco conceptual del procedimiento FAO56, la metodología  $K_c$ - $ET_o$  basada en teledetección deriva el valor del coeficiente de cultivo desde las imágenes multiespectrales adquiridas por sensores a bordo de plataformas espaciales, aerotransportadas o en tierra (Calera et al., 2005). La estimación del coeficiente de cultivo desde estas imágenes aparece cada vez más como una herramienta operativa, basada en una amplia evidencia experimental (Allen et al., 2011; Glenn et al., 2011b), lo que a su vez permitiría generalizar la aplicación precisa del procedimiento FAO56.

El uso de series temporales de imágenes posibilita pues la descripción de la evolución del coeficiente de cultivo a lo largo del ciclo de crecimiento. Las imágenes proporcionan además la descripción espacial de la cubierta, la cual puede presentar y presenta variaciones notables de unas zonas a otras, permitiendo el cálculo de las necesidades de agua espacialmente distribuidas de acuerdo a las demandas de la cubierta.

### 3.2.2. Relación entre el coeficiente de cultivo basal $K_{cb}$ y el índice de vegetación NDVI

La abundante literatura científica desde (Heilman et al., 1982) Neale (Neale et al., 1989), pone de manifiesto la buena relación lineal existente entre el coeficiente de cultivo basal de una cubierta, análogo a un coeficiente de transpiración, y los índices de vegetación, como el Índice de Vegetación por Diferencias Normalizado, NDVI, así como con otros índices como el SAVI. Desde trabajos teóricos (Choudhury et al., 1994), a experimentales (Gonzalez-Dugo et al., 2009) esta relación se ha analizado para una amplia gama de cultivos y vegetación natural (Glenn et al., 2011a).

El NDVI es un parámetro que se obtiene de forma robusta, simple y directa desde las imágenes multiespectrales mediante una combinación algebraica de las reflectividades en el rojo e infrarrojo cercano. El NDVI, sobre el que se cuenta con gran experiencia en teledetección, mide el tamaño fotosintético relativo de la cubierta, y recoge cómo la cubierta vegetal absorbe la radiación solar fotosintéticamente activa.

La relación propuesta entre el valor del coeficiente  $K_{cb}$ , tal y como se define en FAO56 y el índice NDVI se presenta en la ecuación (5) (Campos et al., 2010c), que es muy similar a la encontrada por Neale et al. (1989).

$$5) \quad K_{cb} = 1.44 \text{ NDVI} - 0.1$$

donde:

$K_{cb}$ : coeficiente de cultivo basal, con valores que oscilan entre 0.15 y 1.15

NDVI: Índice de Vegetación por Diferencias Normalizado, obtenido desde imágenes multiespectrales corregidas atmosféricamente y normalizado a las bandas espectrales LandsatETM+; sus valores oscilan entre aproximadamente 0.14 (suelo desnudo) y 0.91 (cubiertas verdes muy densas)

La ecuación (5) permite obtener valores de  $K_{cb}$  desde una imagen en la que se ha calculado el valor del NDVI para cada pixel y asignarlos a los distintos puntos de una parcela en concreto. Además puede obtenerse la evolución temporal del coeficiente  $K_{cb}$  si se cuenta con una serie temporal de imágenes. La secuencia de imágenes permite pues describir la evolución de la cubierta concreta, atendiendo a sus características específicas de siembra y crecimiento y muestra la variabilidad espacial y temporal que los distintos factores de suelo y manejo pueden introducir. El procedimiento basado en la relación descrita por la ecuación (5) ha sido también desarrollado sobre viña y produce resultados comparables a aquellos que calculan el coeficiente de cultivo para viña mediante la medida de la fracción sombreada (Campos et al., 2010b) como se hace en Williams, L.E. and Ayars, J.E. (Williams and Ayars, 2005).

### **3.2.3. Necesidades de agua y necesidades de riego. Determinación directa de la transpiración de una cubierta**

La evapotranspiración de la cubierta en un intervalo temporal es el ritmo al que el vapor de agua sale de la cubierta por los procesos de transpiración y evaporación. Las necesidades de agua de la cubierta son aquellas que reponen el agua intercambiada con la atmósfera. Cuando el suelo explorado por las raíces tiene suficiente humedad la cubierta transpira al máximo ritmo posible. Una vez que el contenido en agua en el suelo cae por debajo de un cierto umbral el cultivo entra en estrés hídrico y el ritmo de transpiración se reduce.

El producto del coeficiente de cultivo basal derivado de las imágenes multiespectrales y la  $ET_0$  obtenida desde estaciones de la red SIAR, permite estimar directamente la transpiración máxima actual que la cubierta puede alcanzar bajo las condiciones de demanda evaporativa indicadas por la  $ET_0$ . El conocimiento de esta transpiración máxima, que no requiere de ningún dato adicional a las imágenes y a las estaciones meteorológicas, puede revestir un gran valor para muchas aplicaciones.

Las ecuaciones (3) y (5) conforman el modelo completo FAO56 basado en teledetección que permite determinar de forma precisa las necesidades de agua, y al incorporar un detallado balance de agua en suelo permite también calcular cuándo esta agua debe ser aplicada. La estrategia de riego para un determinado cultivo suele requerir como un primer paso determinar el agua a aplicar necesaria para que el cultivo crezca al máximo ritmo posible, y por tanto evitar el estrés hídrico. En muchos casos esta puede ser el agua que finalmente se aplique, pero en otros puede interesar un riego deficitario controlado, en el que se maneje el cultivo con un grado de estrés determinado en función de las fases del ciclo de crecimiento para obtener así un óptimo rendimiento.

Un punto crucial en la aplicación del modelo FAO56 reside en las incertidumbres asociadas al balance de agua en la capa de suelo explorada por las raíces y en la modelización de la evaporación del suelo desnudo, como también sucede en otros modelos similares. Esto es intrínseco al propio modelo, más allá de la fiabilidad de la determinación de  $K_{cb}$  mediante imágenes multiespectrales, lo cual descansa en la sencilla relación expresada en la ecuación (5), que obviamente requiere posteriores trabajos de investigación. En especial, el parámetro capacidad de almacenamiento de agua en el suelo es intrínsecamente difícil de conocer incluso con medidas in situ, pues este parámetro integra las características hidráulicas del suelo, el volumen que es explorado por las raíces y la propia capacidad de la planta para extraer el agua; además puede presentar y presenta una alta variabilidad espacial dentro de la misma parcela.

## **3.3. DISPONIBILIDAD DE IMÁGENES DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN. EL SISTEMA WEBGIS SPIDER**

El acceso a las series temporales de índices de vegetación (IV) es, obviamente, necesario para la aplicación de la metodología aquí descrita. Dichas series temporales tienen que ser lo suficientemente densas, esto es la frecuencia de imágenes suficiente, para describir

adecuadamente la evolución temporal de la cubierta vegetal, como se puede observar en la Figura 11.

La frecuencia ideal es la de una imagen por semana, siendo este intervalo temporal el que es también frecuentemente utilizado tanto en la planificación del riego como en la toma de decisiones de manejo del cultivo. Hasta con una frecuencia de 15 días la interpolación lineal entre imágenes consecutivas permite acercarnos con suficiente precisión a los valores diarios (Calera et al., 2009b; Garrido-Rubio et al., 2011) y obtener así también valores semanales. Diversos procedimientos de procesado de imágenes permiten obtener series densas homogéneas de imágenes de IV utilizando la constelación de sensores actualmente en órbita, como son Landsat, DEIMOS, SPOT,... (Martínez, 2014; Villa et al., 2012). De esta forma es posible reducir la limitación que la frecuente presencia de nubes en ciertas zonas y épocas impone.

En la actualidad existen suficientes sensores actualmente en órbita para conseguir una frecuencia de imágenes semanal con resolución espacial entre 5 y 30m, suficiente para la mayor parte de las aplicaciones en agricultura. Sin embargo la adquisición de estas imágenes tiene un coste difícilmente asumible por usuarios particulares. En este aspecto se ha producido un cambio sustancial pues la agencia espacial estadounidense NASA ha adoptado la política de poner libre y gratuitamente a disposición de los usuarios los datos adquiridos por la serie Landsat, ya ortorectificados. Esta decisión se fundamenta en que operando de esta manera se retorna la inversión pública a la sociedad en forma de aplicaciones, que generan a su vez riqueza (Forney et al., 2012; Miller et al., 2011; Serbina and Holly, 2014).

Desde el lanzamiento en 2013 de Landsat 8, las imágenes ya georreferenciadas son accesibles prácticamente en el día de su adquisición a través del portal GLOVIS, operado por el USGS (<http://glovis.usgs.gov/>). En esta misma dirección está definiendo su política la agencia espacial europea ESA, que ha lanzado recientemente Sentinel-2A, de similares características a Landsat 8, y cuya fase de explotación es inminente. Así mismo, dicha política de datos libres es la que adoptó en España el Plan Nacional de Teledetección.

Considerando que las imágenes estén disponibles, aún es necesario un procesado básico para construir las secuencias temporales de índices de vegetación en forma que asegure la homogeneidad y consistencia de los datos. Finalmente el desarrollo de las tecnologías de la información, y concretamente las plataformas webGIS, hace posible acceder a estas imágenes vía internet.

A través del CENTER, un proyecto del MAGRAMA denominado SPIDER-CENTER, permite el acceso libre a la secuencia de imágenes multispectrales adquiridas principalmente por Landsat 8 y correspondientes a los años 2014 y 2015 en el ámbito espacial de la España peninsular. Así, un conjunto de productos básicos y avanzados entre los que destacamos secuencias temporales de imágenes NDVI y  $K_{cb}$  compuestas de aproximadamente 1000 imágenes en estos dos años, se encuentran disponibles para todos aquellos usuarios que deseen explotarlas. Además, se han incorporado tras su procesado y normalización series de imágenes Spot5 correspondientes a sitios seleccionados. Todas estas series de imágenes y productos derivados se pueden acceder a

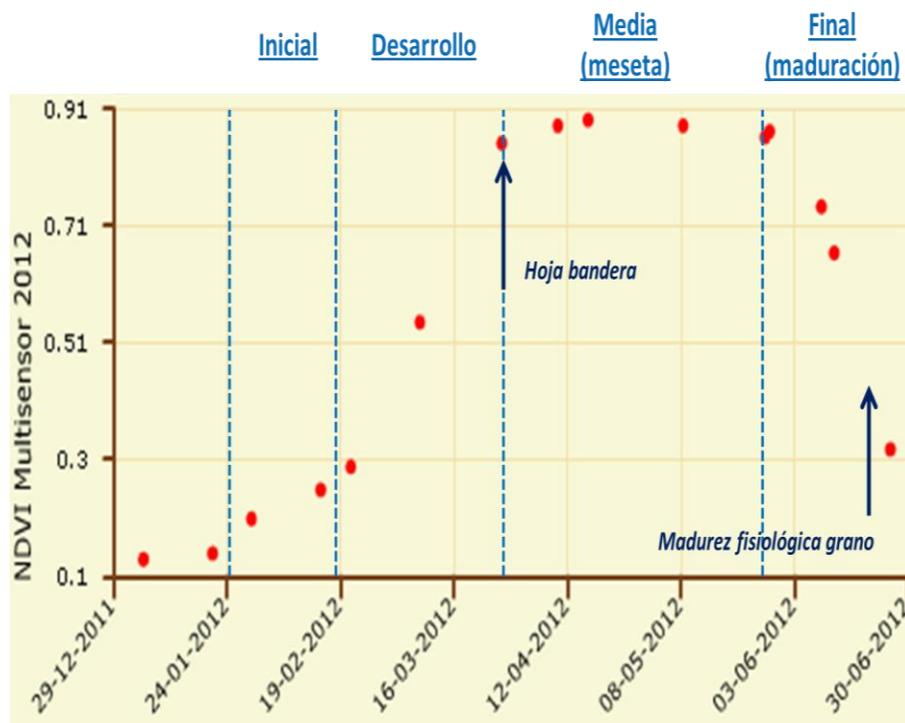
través del sistema SPIDERwebGIS® (<http://zeus.idr-ab.uclm.es/publico/webgis/>). También se puede acceder desde la propia web del CENTER (<http://www.center.es/>). El sistema permite visualizar la secuencia temporal imágenes y consultar la evolución temporal de los índices de vegetación de parcelas individuales, y por tanto de los coeficientes de cultivo. Detalles acerca del uso del sistema, así como de los productos accesibles, se encuentran en el documento “Acceso a secuencias temporales de imágenes de satélite 2014 - 2015 en la España peninsular. Proyecto SPIDER-CENTER”.

### 3.4. APLICACIÓN A CULTIVOS HERBÁCEOS

En esta sección se describen aproximaciones operativas a la determinación de las necesidades de agua y a las de riego con un mínimo de datos de entrada. La metodología rigurosa es la descrita anteriormente y en muchos casos se dispone del conocimiento de los suelos y los cultivos que junto al conocimiento técnico permiten su aplicación.

La Figura 11 describe la evolución de una cubierta de trigo de regadío mediante los valores del NDVI obtenidos de una serie temporal de imágenes de satélite, concretamente de la empresa española DEIMOS. En ella se indican las diferentes fases del ciclo de crecimiento, separadas por líneas discontinuas, así como algunas fases fenológicas relevantes tales como la aparición de la hoja bandera y el punto en que el grano alcanza la madurez fisiológica. Esta curva corresponde a un trigo cuya producción se situó alrededor de los 10.000 kg/ha, siendo pues cercana a la curva “ideal”. Otra característica general a otros muchos cultivos, que la propia figura señala, es la suavidad con que la cubierta evoluciona a lo largo de su ciclo de crecimiento.

La clara diferenciación de las fases a efectos de la aplicación del coeficiente de cultivo en que clásicamente se diferencia el ciclo de crecimiento del cultivo (Allen et al., 1998a) permite contabilizar la duración de dichas fases para la cubierta especificada, lo que puede ser de interés en algunas aplicaciones.



**Figura 11.** Evolución de una cubierta de trigo de regadío para el año 2012, descrita mediante el índice de vegetación obtenido desde una serie temporal de imágenes DEIMOS1. En la figura se muestran superpuestas las fases del ciclo de crecimiento separadas por líneas discontinuas y también algunas fases fenológicas relevantes.

### 3.4.1. Relación entre el coeficiente de cultivo único $K_c$ y el índice de vegetación NDVI

En cultivos herbáceos se utiliza ampliamente el coeficiente de cultivo único  $K_c$ . Desde las imágenes multiespectrales se obtiene directamente el coeficiente de cultivo basal, por lo que para obtener el coeficiente de cultivo único  $K_c$  se ha de promediar la componente evaporativa de la fracción de suelo desnudo. Esta componente evaporativa es altamente dependiente de la superficie efectivamente mojada, esto es del sistema de riego y de la frecuencia, además del sombreado efectivo que la cubierta establezca sobre este suelo y de las propias características del suelo.

La ecuación (6) que se propone para la relación entre el coeficiente de cultivo  $K_c$  y el NDVI ha sido ampliamente validada en cultivos herbáceos como trigo, cebada, maíz, algodón, girasol,... que en su fase de máximo desarrollo alcanzan cobertura completa (Allen, 2011; Cuesta et al., 2005), suponiendo un manejo estándar para sistemas de riego como aspersión y pivot.

$$6) \quad K_c = 1.25 \text{ NDVI} + 0.1$$

### **Limitaciones de uso de la ecuación (6)**

Para el establecimiento del cultivo después de siembra, en su fase inicial de nascencia, la relación (6) puede infraestimar el valor requerido del  $K_c$ , pues en estos casos el comportamiento evaporativo del suelo desnudo es muy dominante. En esta fase suelen ser necesarios riegos frecuentes para garantizar la nascencia e implantación, tal y como se describe en FAO56.

Ocurre de forma semejante para cultivos que en su fase de máximo desarrollo no alcanzan cubierta completa y el porcentaje de suelo desnudo es elevado, como puede suceder en los casos de ajos, cebollas, y otros hortícolas, que además suelen requerir riegos frecuentes y cortos dado que tienen sistemas radiculares de escasa profundidad y requieren mantener elevados contenidos de agua en el suelo explorado por las raíces, pues son muy sensibles a la escasez de agua. Además es necesario también diferenciar si el sistema de riego moja o no completamente el suelo.

En general, cuando la fracción de suelo desnudo es importante suele ser preferible utilizar la formulación coeficiente dual y modelar así de forma independiente la evaporación del suelo desnudo de la componente de transpiración, lo que además permite tener en cuenta el sistema de riego y por tanto la superficie efectivamente mojada. La simulación de la evaporación desde el suelo desnudo es uno de los aspectos que más ha requerido desarrollo desde la publicación de FAO56 (Allen, 2011; Torres and Calera, 2010). En muchos casos suele ser adecuado determinar la transpiración máxima de la cubierta mediante imágenes y aproximarse al análisis de la componente evaporativa del suelo específicamente y ganar experiencia suficiente para el uso de aproximaciones que pueden ser de carácter local.

#### ***3.4.2. Aproximación operativa a las necesidades de agua de riego en cultivos herbáceos***

En primera aproximación, sin tener en cuenta el agua almacenada en suelo y el posible ascenso desde capas freáticas, las necesidades de riego pueden calcularse simplemente como aquellas que reponen el agua extraída por la cubierta menos la aportada por precipitación, con un balance simplificado como el expresado por la ecuación (7).

$$7) \quad I_r = ET - P_p$$

donde:

$I_r$ : necesidades netas de riego, cantidad de agua suministrada por riego que alcanza el suelo y se infiltra en él

$ET$ : evapotranspiración de la cubierta

$P_p$ : precipitación efectiva, parte de la precipitación que alcanza el suelo y se infiltra en él

En muchos casos la gestión del riego se establece en el intervalo temporal de una semana, que sería el adecuado para utilizar la ecuación (7). La precipitación debiera ser medida in situ, pues su variabilidad espacial puede ser elevada.

En un primer paso la ET sería aquella que corresponde a una cubierta en ausencia de estrés, que se calcularía combinando las ecuaciones (1) y (5), en la forma

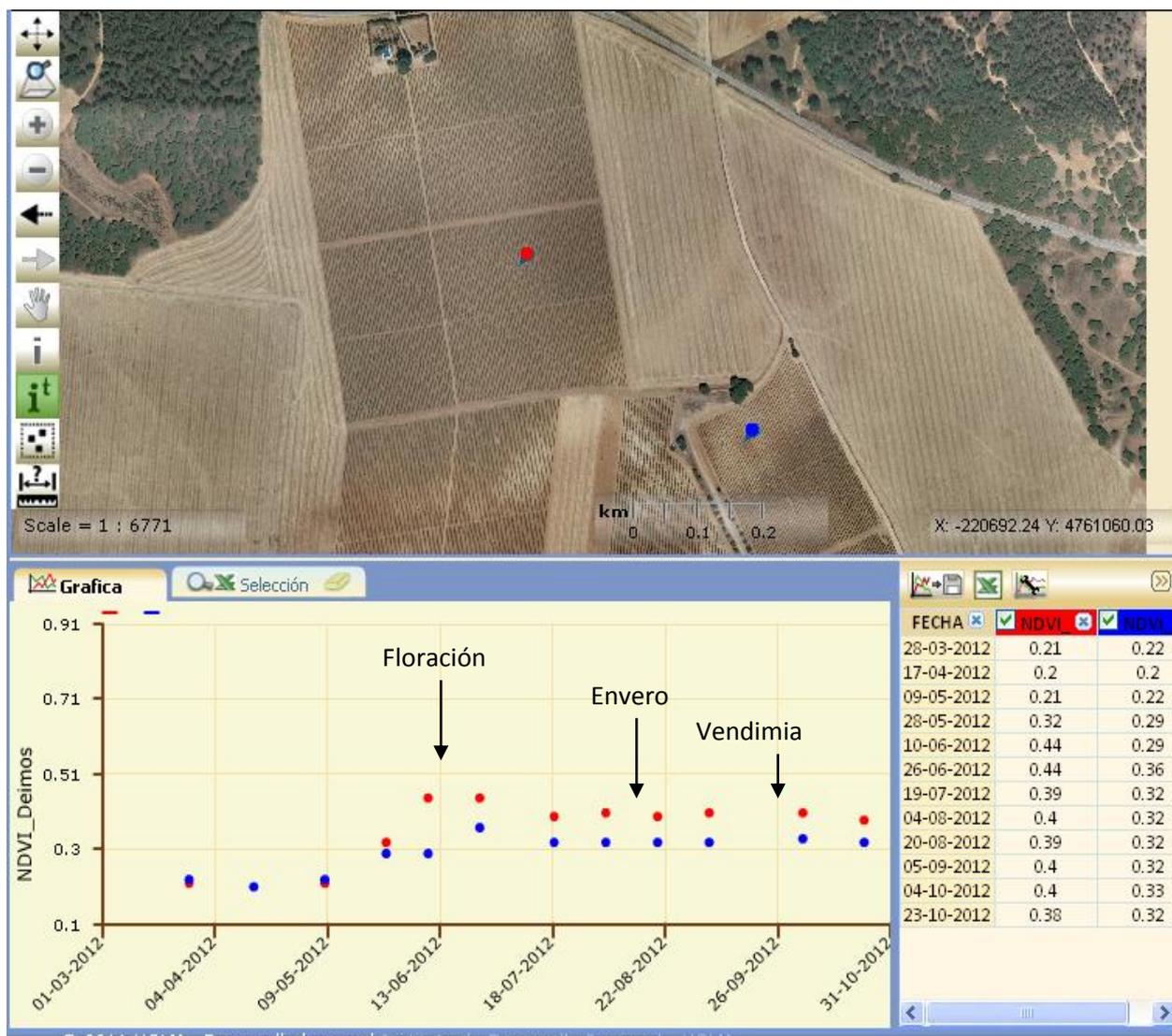
$$8) \quad ET = (1.25 \text{ NDVI} + 0.1) ET_0$$

La ecuación (8) está afectada por las mismas limitaciones de manejo que la ecuación (6), y proporciona las necesidades netas de agua, que minoradas por la precipitación efectiva, estiman las necesidades netas de agua de riego. La determinación de las necesidades brutas de riego requiere del conocimiento de la denominada eficiencia del sistema de riego, que recoge las características del sistema de riego utilizado y su manejo.

En muchos casos y fundamentalmente cuando el agua es escasa y/o su coste es muy alto, obtener un óptimo de producción puede requerir que el agua de riego ha de ser aplicada una vez que se ha desarrollado un grado de estrés entre suave y moderado en las fases de crecimiento adecuadas, de tal forma que no supongan una merma apreciable en la producción, siguiendo las técnicas de riego deficitario controlado. También es frecuente si se tiene disponibilidad el aplicar un riego de apoyo que puede incrementar o asegurar la producción esperable.

### 3.5. APLICACIÓN A LA VIÑA Y CULTIVOS LEÑOSOS

Los cultivos leñosos se diferencian de los cultivos herbáceos fundamentalmente en que sus sistemas radiculares son capaces de explorar volúmenes de suelo mayores que en el caso de cultivos anuales, siendo en muchos casos la fracción de suelo desnudo mucho mayor. El papel del almacenamiento del agua en suelo es pues muy relevante, siendo capaz de utilizar el agua recogida en estaciones anteriores a la de crecimiento.



**Figura 12.** Evolución de la cubierta vegetal en dos puntos de una viña en espaldera representativa de la zona Mancha, para el año 2012, descrita mediante el índice de vegetación obtenido desde una secuencia de imágenes de satélite DEIMOS1. Los valores son el promedio agregado sobre una superficie de una ha centrada en el punto de muestreo. En la figura la viña se muestra sobre una ortofotografía de 0,5 m de resolución espacial, en la que se indican las zonas muestreadas.

La viña es un cultivo leñoso en el que el riego se ha incorporado recientemente permitiendo asegurar la producción y, también, incrementarla sustancialmente. A diferencia de otros cultivos anuales y leñosos, en el caso de la viña es bien conocido el incremento de la calidad del fruto cuando la planta transpira en ciertas fases del ciclo de crecimiento a un ritmo menor del máximo que la cubierta vegetal puede transpirar, esto es cuando se induce en la planta un cierto grado de estrés hídrico (Van Leeuwen et al., 2009). Por ello la descripción que sigue se

centra en el caso de la viña, aunque las relaciones y conceptos se pueden extender y utilizar en otros cultivos leñosos.

La Figura 12 muestra la evolución del NDVI para dos puntos de una parcela de viña de tempranillo en espaldera en regadío. En ella se muestra el patrón temporal típico de la evolución de la viña en la zona de La Mancha, así como son evidentes las diferencias espaciales de vigor en una misma parcela.

### 3.5.1. Necesidades de agua de la viña y necesidades de riego

La transpiración máxima de la cubierta actual de la viña bajo unas determinadas condiciones de demanda atmosférica puede ser calculada directamente desde el coeficiente de cultivo basal y la  $ET_0$ . Este valor permite aproximarnos de forma sencilla y directa al valor de las necesidades netas de agua de riego, respondiendo pues a la pregunta de cuánto regar.

Para ello es preciso determinar en primer lugar bajo qué restricciones se desea aplicar el agua de riego, a lo que se suele denominar riego deficitario controlado, teniendo en cuenta que en el caso de la viña es deseable un determinado grado de estrés hídrico una vez la baya ha alcanzado un tamaño umbral para obtener el grado óptimo de calidad del fruto. Cifras del 60-70% de restricción son mencionadas frecuentemente en la literatura.

Como ejemplo se presenta la estimación de las necesidades netas de riego en ausencia de precipitación para las viñas cuya evolución se indica en la Figura 12. Como se puede observar en dicha figura, a partir de la floración, la arquitectura de las viñas se mantiene constante con un valor de NDVI de, aproximadamente, 0.4 y 0.32, respectivamente, lo que aplicando la ecuación (4) conduce a valores de coeficiente de cultivo basal dados por  $K_{cb1} = 0.4 \times 1.44 - 0.1 = 0.48$  y  $K_{cb2} = 0.32 \times 1.44 - 0.1 = 0.36$ , respectivamente.

Para este ejemplo asumimos un valor de  $ET_0$  promedio de 6.5 mm/día, valor típico de los meses de Julio y Agosto de amplias zonas del centro de la península ibérica; así la transpiración máxima de estas cubiertas en ausencia de estrés hídrico sería  $0.48 \times 6.5 = 3.12$  mm/día, y  $0.36 \times 6.5 = 2.34$  mm/día. En un caso específico el valor de  $ET_0$  sería el proporcionado por la estación meteorológica cercana a la localización de la viña concreta, siendo el período razonable de manejo el de la semana.

Si asumimos un riego deficitario del 70%, las necesidades netas de riego serán  $0.7 \times 3.12 = 2.2$  mm/día, y  $0.7 \times 2.34 = 1.64$  mm/día, respectivamente. Estas necesidades netas de agua de riego se refieren a cantidades de agua puestas en suelo donde pueden ser tomadas por las raíces. Para calcular las necesidades brutas es necesario tener en cuenta la eficiencia y uniformidad del sistema de riego, incluyendo la evaporación desde la superficie del suelo, lo que a su vez depende de la superficie de la zona mojada y frecuencia de riego. Para un sistema de goteo usual y un riego semanal, el componente evaporativo  $K_e$  puede estimarse alrededor de 0.05. El coeficiente de cultivo para las dos viñas consideradas para el período en que la arquitectura de la cubierta está bien establecida sería de acuerdo con la ecuación (2):  $K_{c1} = K_{cb1} + K_e = 0.48 + 0.05$

= 0.53 y  $K_{c2} = K_{cb2} + K_e = 0.32 + 0.05 = 0.37$ . Así pues, las necesidades brutas de riego, considerando una alta uniformidad del sistema de riego serían 2.53 mm/día y 1.94 mm/día, respectivamente. En caso de ocurrir precipitación, las necesidades de agua de riego han de minorarse en la precipitación efectiva.

Obtener un óptimo de producción y calidad requiere en el caso de la viña que el agua de riego ha de ser aplicada una vez que se ha desarrollado un grado de estrés entre suave y moderado en las fases de crecimiento adecuadas, de tal manera que se eviten crecimientos de hojas jóvenes y manteniendo elevada la actividad fotosintética de las hojas maduras; habitualmente este grado de estrés es deseable una vez que el tamaño de la baya alcanza un umbral crítico pues un estrés temprano puede reducir el número y tamaño de las bayas. Un exceso de agua a lo largo del ciclo de crecimiento lleva a un crecimiento vegetativo excesivo, y a un empobrecimiento de la calidad del fruto. Un estrés demasiado severo puede primero reducir la actividad fotosintética de las hojas maduras por cierre estomático, y posteriormente provocar defoliación, lo que se traducirá en una disminución de la producción y también de la calidad.

Pero determinar cuándo es preciso aplicar agua porque la planta llega al grado de estrés deseado depende del vigor y desarrollo del propio cultivo, de la cantidad de agua almacenada en el estrato de suelo utilizable por la planta, de las condiciones meteorológicas, esto es de la precipitación y demanda atmosférica, de las condiciones climáticas a las que la cubierta se ha aclimatado semiárido, influencias marítimas,..., de las variedades en cuestión y de los propios objetivos de manejo. Multitud de procedimientos se viene utilizando para determinar el grado de estrés óptimo.

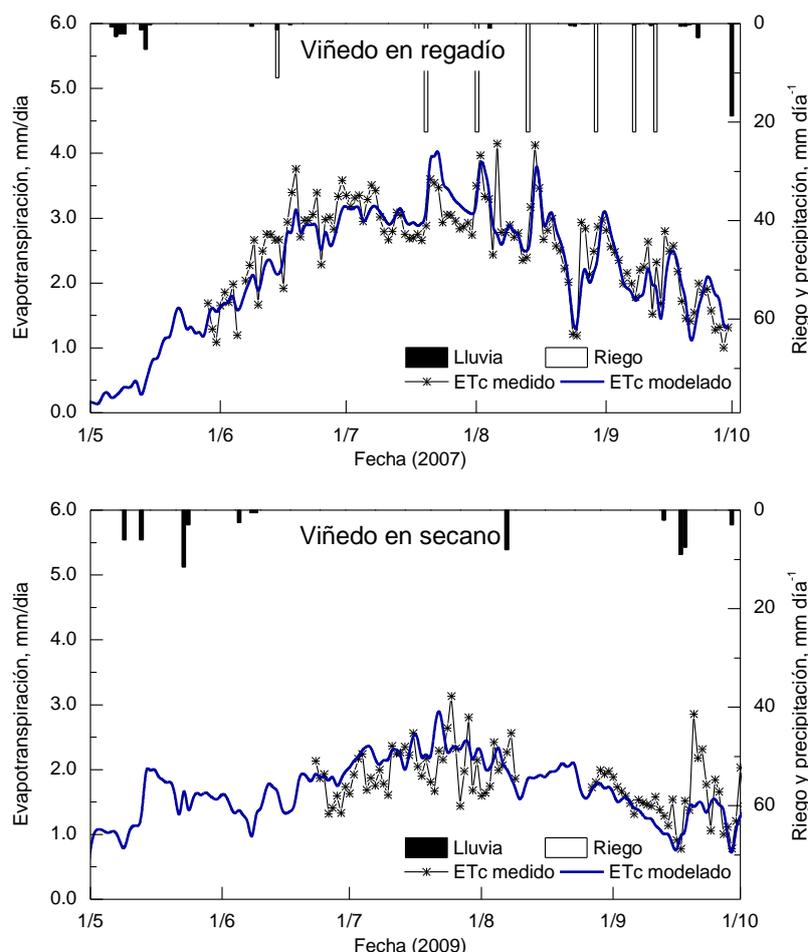
La ecuación (3) integra gran parte de los factores mencionados anteriormente a través de los parámetros utilizados en dicha ecuación. El papel relevante del suelo lo considera a través del parámetro coeficiente de estrés,  $K_s$ , que requiere de la aplicación de un balance de agua a la capa de suelo explorada por las raíces. Cuando el contenido de agua utilizable en el estrato de suelo explorado por las raíces cae por debajo de un cierto valor umbral, para la viña típicamente el 55% del valor total, ver FAO56 para otros cultivos, el coeficiente de estrés es menor que la unidad, indicando que el ritmo de ET disminuye.

El balance de agua en suelo, que incorpora como una entrada más la precipitación registrada, permite determinar el coeficiente de estrés y el coeficiente de evaporación desde el suelo desnudo, el cual a su vez considera el sistema de riego utilizado y la frecuencia de aplicación. Este balance requiere del conocimiento de la cantidad máxima de agua que puede almacenar la capa de suelo donde se alojan las raíces, que a su vez depende de la profundidad de raíces y de la capacidad de retención de agua del suelo. Finalmente, se determina la necesidad de agua de riego a aplicar para mantener un coeficiente de estrés adecuado.

El modelo presentado ha sido validado frente a datos medidos durante sucesivas campañas de campo en viñedos en La Mancha (Campos et al., 2010a; Campos et al., 2010c) y del sur de Italia (Consoli and Barbagallo, 2012). La Figura 13.a muestra la comparación de los valores simulados de evapotranspiración frente a valores medidos por una estación de covarianza de

torbellinos en un cultivo de viñedo en regadío manejado mediante sistema de espaldera vertical y con una densidad de plantación de 2200 plantas/ha. En la Figura 13.b se presentan los datos experimentales obtenidos en un viñedo en régimen de secano, manejado mediante el sistema tradicional de viña en vaso y con una densidad de plantación de 1100 plantas/ha. El acuerdo general obtenido indica que el modelo permite reproducir la evapotranspiración del viñedo con una precisión superior a 0.5 mm/día.

Las necesidades de agua netas, esto es evapotranspiración, del viñedo en regadío en la Mancha en la campaña de 2007 se estimaron en 350 mm desde el 1 de mayo hasta el 30 de septiembre de 2007; en ese período la precipitación registrada fue de 45 mm y el riego aplicado fue de 143 mm. Esto significa que 162 mm (un 46%) fueron extraídos del almacenamiento en el suelo. El viñedo en vaso consumió un total de 265 mm de mayo a octubre de 2009, y la precipitación registrada en ese período fue de 68 mm. Por tanto alrededor de 197 mm se extrajeron desde el almacenamiento en suelo. Estos datos indican el relevante papel del almacenamiento de agua en suelo y la capacidad de extracción de la viña.



**Figura 13.** Comparación de los valores medidos y modelados de evapotranspiración para un cultivo de viñedo en regadío (año 2007), caso a, y viñedo en secano (año 2009), caso b. Adaptado de (Campos et al., 2010c) y (Campos et al., 2010a).

La dificultad en disponer de datos precisos sobre el papel del almacenamiento en suelo es por lo que los mejores métodos de determinación del estatus hídrico de la viña miden directamente sobre la planta, pues es la planta y su ritmo de transpiración el mejor indicador acerca del sistema planta-suelo-atmósfera. Ampliamente reconocidos entre estos métodos están es el potencial hídrico en tallo (Van Leeuwen et al., 2009), dendrómetros, etc. Estos sistemas tienen la limitación de su representatividad, pues suelen ser datos puntuales. El acoplamiento de la metodología basada en imágenes multiespectrales con las características conocidas de la parcela y con los datos puntuales procedentes de sensores en tierra puede ser un camino práctico que conduce a buenos resultados. Las imágenes recogen el vigor de la vegetación de la cubierta de la viña y su distribución espacial como ningún otro procedimiento puede hacer (Martinez-Casasnovas et al., 2012). Y dado que la viña es un cultivo multianual puede darse una acumulación de conocimiento de gran interés práctico para el mejor manejo.

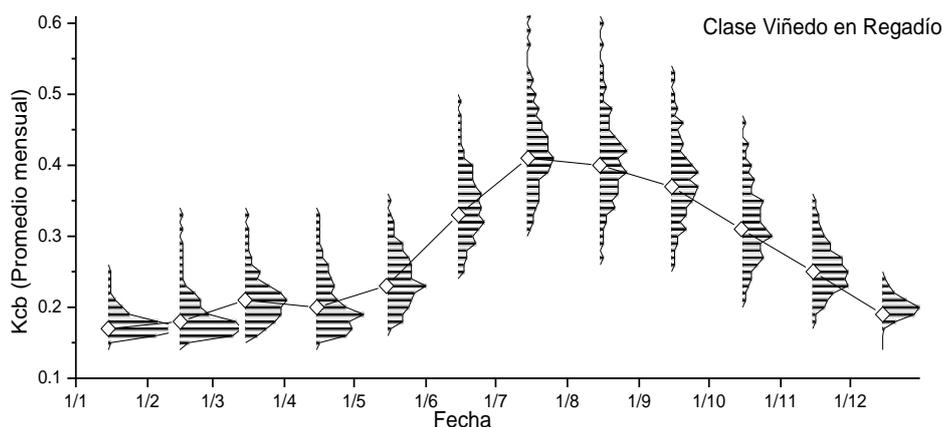
Un campo emergente que no se detalla aquí es el basado en imágenes de muy alta resolución espacial que permiten captar señales de temperatura, reflectividad y fluorescencia correspondientes específicamente a las plantas, lo que abre la puerta a la determinación del estatus hídrico de la vegetación basado en este tipo de imágenes.

### **3.5.2. Variabilidad de la cubierta de la viña y de las necesidades de agua**

La dificultad de cuantificar la variabilidad de la cubierta vegetal de la viña lleva en muchas ocasiones a tratar la viña de forma simplificada, por ejemplo asignando un único valor de las necesidades de agua de riego dentro de una misma parcela o bien a todas las parcelas de viña.

Las imágenes de índices de vegetación recogen el vigor de la vegetación, su evolución temporal y su distribución espacial, permitiendo cuantificar las diferencias dentro de una parcela o con otras parcelas. La Figura 14 muestra la evolución temporal en promedio del coeficiente de cultivo basal para la viña de regadío en el área de La Mancha Oriental, cerca de unas 21000 ha, previamente identificada. En dicha Figura 14 puede apreciarse la dispersión de valores de  $K_{cb}$ , indicada por los histogramas representados que permiten cuantificar la variabilidad en el valor de este parámetro en el ámbito espacial estudiado.

Como se puede observar, en promedio la viña alcanza su máximo desarrollo en los meses de Julio y Agosto, con valores promedio de  $K_{cb}$  cercanos a 0.4 durante estos meses. Los valores mínimos, cercanos a 0.15, se obtienen durante el periodo de latencia y corresponden a suelo desnudo.



**Figura 14.** Evolución mensual del coeficiente  $K_{cb}$  promedio ( $\diamond$ ) y diagramas mensuales de frecuencias de los valores obtenidos en toda la superficie estudiada durante el año 2009.

Se han calculado las necesidades de agua de riego, al objeto de estudiar su variación atendiendo solamente a la variabilidad indicada en el  $K_{cb}$ , teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas del año 2009 y considerando en primera aproximación el mismo suelo para todas las parcelas.

Las necesidades de riego estimadas oscilan entre 75 y 200 mm/año para la campaña con un valor promedio de 110 mm/año. Estos resultados están sujetos a las condiciones iniciales de simulación, en las que se ha supuesto que la viña brota en Abril con el almacenamiento del suelo lleno, estimado en 225 mm, y que se empieza a regar, aproximadamente en la primera quincena de Julio, una vez que alcanza un estrés de 0.7 y se mantiene así hasta cosecha. El 2009 responde a un año típico del clima Mediterráneo continental de la Mancha: las lluvias de otoño y primavera suelen llenar el almacenamiento en suelo disponible para las plantas al final de la primavera, y el verano es seco y caluroso, a pesar de la escasez de precipitaciones, que se sitúan entre 350-400 mm/año en promedio. La variabilidad meteorológica condiciona estas cifras de necesidades de riego, incrementándolas si se produce sequía del otoño a la primavera, y disminuyéndolas si se produce un incremento de precipitaciones en verano. En el caso de la viña en secano es este almacenamiento en suelo el responsable de que la viña pueda completar su ciclo de crecimiento, por lo que parece ser el factor determinante para que este cultivo se haya desarrollado en esta área semiárida en ausencia de regadío.

### Agradecimientos

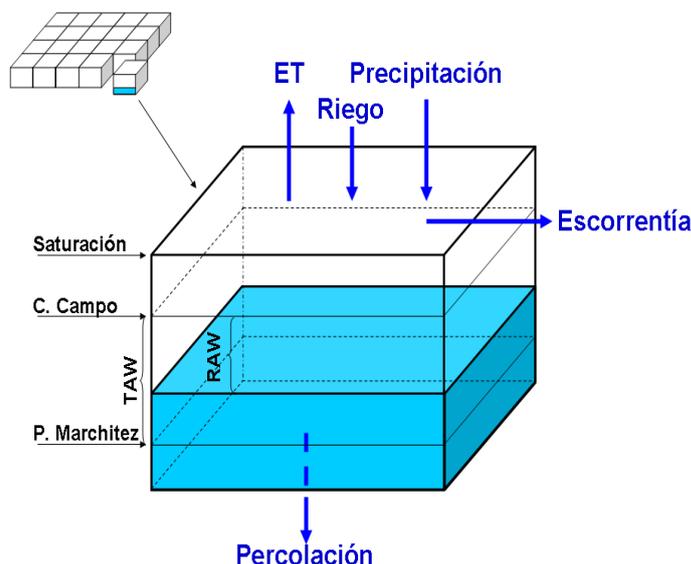
Los resultados presentados en este trabajo han sido obtenidos en el marco de proyectos orientados al desarrollo y validación de las metodologías. Entre estos proyectos destacamos CERES (Acoplamiento de los modelos de balance de agua y balance de energía mediante teledetección para el seguimiento de la evapotranspiración, humedad en suelo y estrés hídrico, contrato AGL2011-30498-C02-01, Ministerio de Ciencia e Innovación), EBHE (Evapotranspiración, balance hídrico y estrés, contrato CGL2008-04047, Ministerio de Ciencia e Innovación), SIRIUS Sustainable Irrigation water management and River-basin governance: Implementing User-driven Services (FP7-SPACE-2010-1) y SPIDER-CENTER (Trabajos de estudio

de innovación para un uso más eficiente del agua en el regadío mediante herramientas basadas en la Red SIAR, la Teledetección y SIG, TSA0054103).

### 3.6. BALANCE DE AGUA EN EL SUELO Y DEFINICIÓN DEL COEFICIENTE DE ESTRÉS HÍDRICO

La Figura A1 muestra las componentes del balance de agua en la capa de suelo explorado por las raíces. La ecuación A.I.1 muestra el balance simplificado, pues no se considera ni ascenso capilar ni escorrentía superficial; en ella, el agotamiento de agua en la zona radicular ( $D_{r,i}$ ) depende del agotamiento de agua en el suelo en el día anterior ( $D_{r,i-1}$ ), de la ET, del riego aplicado ( $I_r$ ), de la precipitación ( $P_p$ ) y de la percolación a capas más profundas ( $D_p$ ). Según esta aproximación el valor de  $D_{r,i}$  nunca negativo, puesto que el suelo drenará agua a capas más profundas cuando las entradas de agua, riego y precipitación, superan la capacidad de almacenamiento dada por la capacidad de campo y el volumen de suelo explorado por las raíces. El valor de  $D_{r,i}$  es 0 cuando todo el perfil de suelo explorado por las raíces se encuentra a capacidad de campo.

$$A.I.1 \quad D_{r,i} = D_{r,i-1} + ET + D_p - I_r - P_p$$



**Figura A.1.-** Componentes principales del balance de agua en el estrato de suelo explorado por las raíces

La formulación del coeficiente de estrés hídrico es la propuesta en el manual FAO56 tal y como se muestra en la ecuación A.I.2. Según esta formulación el estrés hídrico en el cultivo ocurre a partir de que el valor de  $D_{r,i}$  supera un cierto umbral que se conoce como el agua fácilmente utilizable, RAW. El valor de RAW, esto es el valor de  $D_{r,i}$  a partir del cual el cultivo sufre condiciones de estrés, es dependiente del cultivo. Los valores más usuales están tabulados en FAO56 como una fracción de los valores de TAW, que es el agua total almacenable en el estrato de suelo explorado por las raíces.

$$\text{A.I.2. } K_s = 1 \quad , \text{ Si } D_{r,i} < \text{RAW}$$

$$K_s = (TAW - D_{r,i}) / (TAW - \text{RAW}) \quad , \text{ Si } D_{r,i} \geq \text{RAW}$$



**INNOVACIÓN EN EL REGADÍO**  
**UN USO MÁS EFICIENTE DEL AGUA INTEGRANDO**  
**RED SIAR, TELEDETECCIÓN Y SIG**  
**Proyecto SPIDER-CENTER**  
**2014 – 2015**

**PARTE C. MATERIALES, MÉTODOS Y**  
**RESULTADOS**



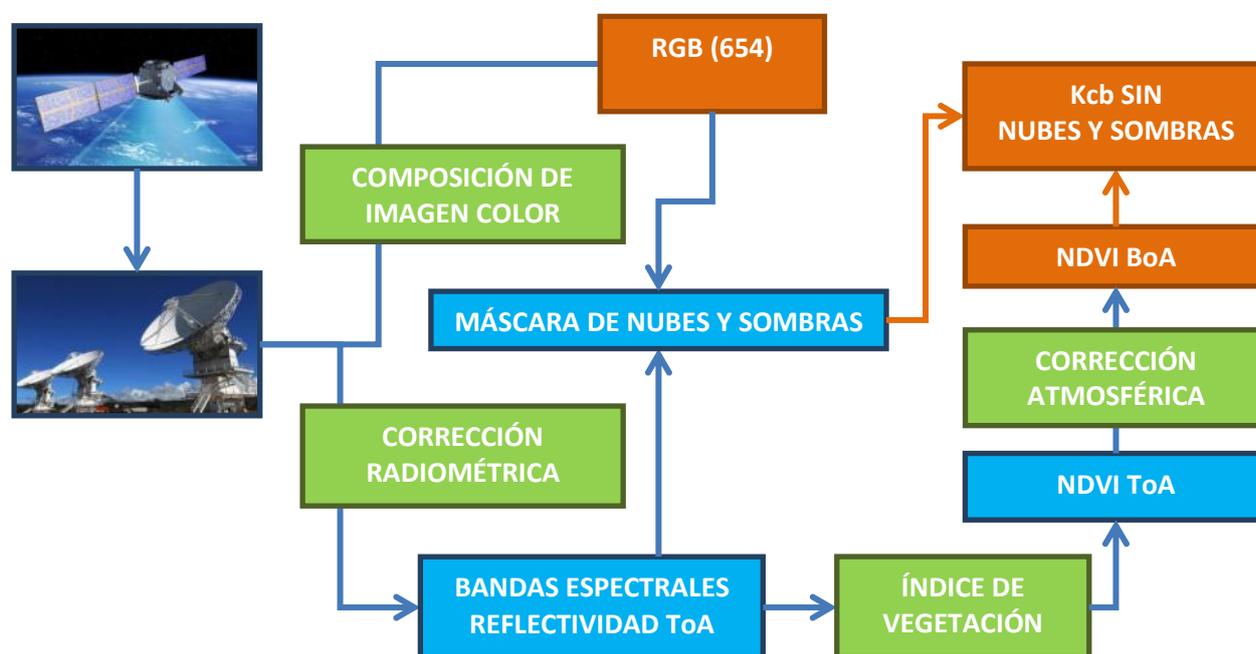
## 1. METODOLOGÍA DE LOS PRODUCTOS BÁSICOS

El procesado de las imágenes de satélite, cuyo fin es obtener series multitemporales, supone una de las bases sobre la que construir los productos finales, con los que monitorizar las superficies en regadío y estimar sus necesidades hídricas. En el presente anejo se especifica la metodología empleada durante el procesado de las imágenes capturadas por el instrumento Operational Land Imager (OLI) del satélite Landsat 8, para obtener los productos básicos especificados a continuación:

- El índice de vegetación NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*)
- Imagen de combinación color (nombrada en adelante RGB)
- Coeficiente de cultivo basal (Kcb) sin nubes y sombras

### 1.1. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA DEL PROCESADO

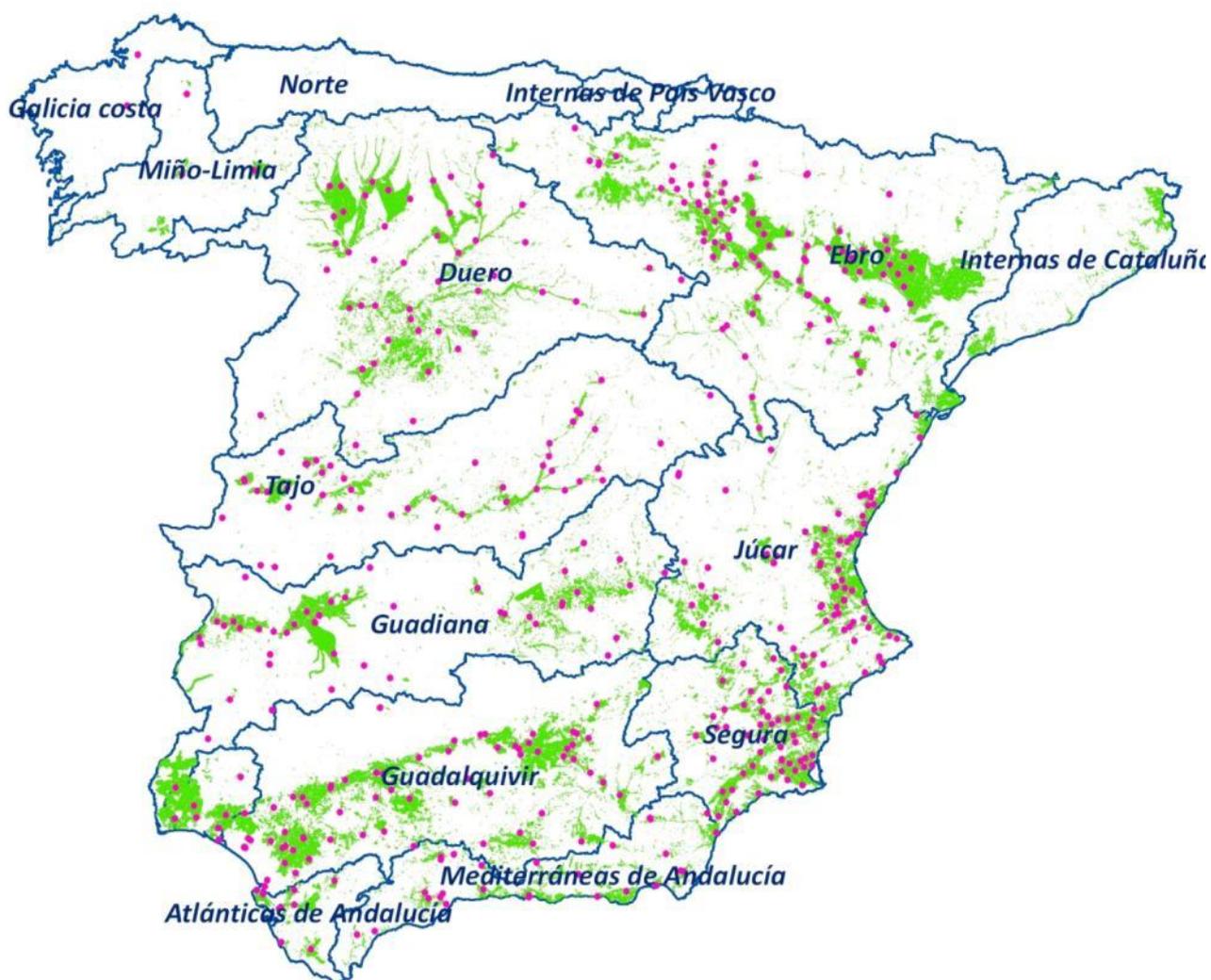
En la figura siguiente, se muestra el diagrama de flujo del procesamiento básico de imágenes propuesto.



**Figura 15.** Diagrama del procesamiento básico de imágenes de satélite. Los diferentes colores muestran los procesados realizados (verde), los productos intermedios obtenidos (azul) y los productos básicos finales generados (naranja).

## 1.2. DIMENSIÓN DEL PROCESADO, ÁMBITO ESPACIAL Y TEMPORAL

El ámbito espacial es la España Peninsular mientras que el ámbito temporal abarca los años naturales 2014 y 2015. Su ejecución está centrada en la monitorización de las superficies regables, particularmente en aquellas comunidades de riego, donde hay estaciones de la red SIAR (Sistema de Información Agroclimática para el Regadío). En aquellas comunidades donde no existan estaciones SIAR, la información necesaria se recopilará de otras redes de estaciones meteorológicas disponibles.



**Figura 16.** Ámbito espacial. Demarcaciones hidrográficas de la península Ibérica (línea azul), zonas regables (polígonos verdes) y estaciones de la red SIAR (puntos rosas).

### 1.3. IMÁGENES EMPLEADAS

Las imágenes multispectrales del satélite *Landsat 8 OLI* forman el cuerpo principal de las imágenes procesadas, pudiendo ser necesario el procesamiento de otras imágenes, también multispectrales del satélite *Spot5 (Take5)*. En la siguiente tabla se describen los detalles generales de los satélites empleados.

**Tabla 6.** Descripción de los satélites empleados.

Satélite	Landsat 8 OLI	Spot 5
<b>Barrido</b>	180 x 180 Km	60 x 60 Km
<b>Bandas espectrales (µm)</b>	8 bandas + Pancromática NIR: 0,851-0,879 Rojo: 0,636-0,673 Verde: 0,533-0,590	4 bandas + Pancromática NIR: 0,780-0,890 Rojo: 0,610-0,680 Verde: 0,500-0,590
<b>Resolución espacial</b>	30 m	10 m
<b>Tiempo de revisita</b>	16 días	5 días

### 1.4. ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

La adquisición de imágenes depende del satélite a emplear. En todos los casos, el criterio mínimo para la descarga de las imágenes ha sido la realización de una inspección visual previa de la imagen para saber si estaba cubierta en su gran mayoría por nubes y descartar su adquisición en tal caso.

En cuanto a la descarga de las imágenes *Landsat 8* existen diferentes posibilidades para su adquisición. El primero consiste en emplear la web del *USGS* llamada *Global Visualization Viewer (Glovis)* (<http://glovis.usgs.gov/>) (Figura 17). Dicha web es una herramienta de búsqueda de imágenes y pedido de estas cuya característica fundamental es que la imagen es proporcionada en un breve tiempo tras la pasada del satélite. En segundo lugar, también se han descargado imágenes de forma masiva desde la web *USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center Science Processing Architecture (ESPA)* (<https://espa.cr.usgs.gov/>) (Figura 18). Empleando esta otra web es posible adquirir un mayor número de imágenes simultáneamente aunque el tiempo de espera es superior al de la primera opción.

En cuanto a la descarga de las imágenes del satélite *Spot5*, la Agencia Espacial Europea (ESA) y el centro nacional Francés de estudios espaciales (CNES), cerraron un acuerdo antes de la retirada de dicho satélite, para que éste simulase la toma de imágenes del satélite recientemente lanzado *Sentinel-2A*. Así, durante un periodo que abarca desde abril hasta septiembre de 2015, las imágenes *Spot5* fueron de adquisición libres y gratuitas para 150 sitios alrededor del mundo. En España, estuvieron accesibles imágenes de Barrax (Albacete), Albufera (Valencia), Madrid (Madrid) y Figueras (Gerona).



Figura 17. Web USGS Global Visualization Viewer (Glovis).

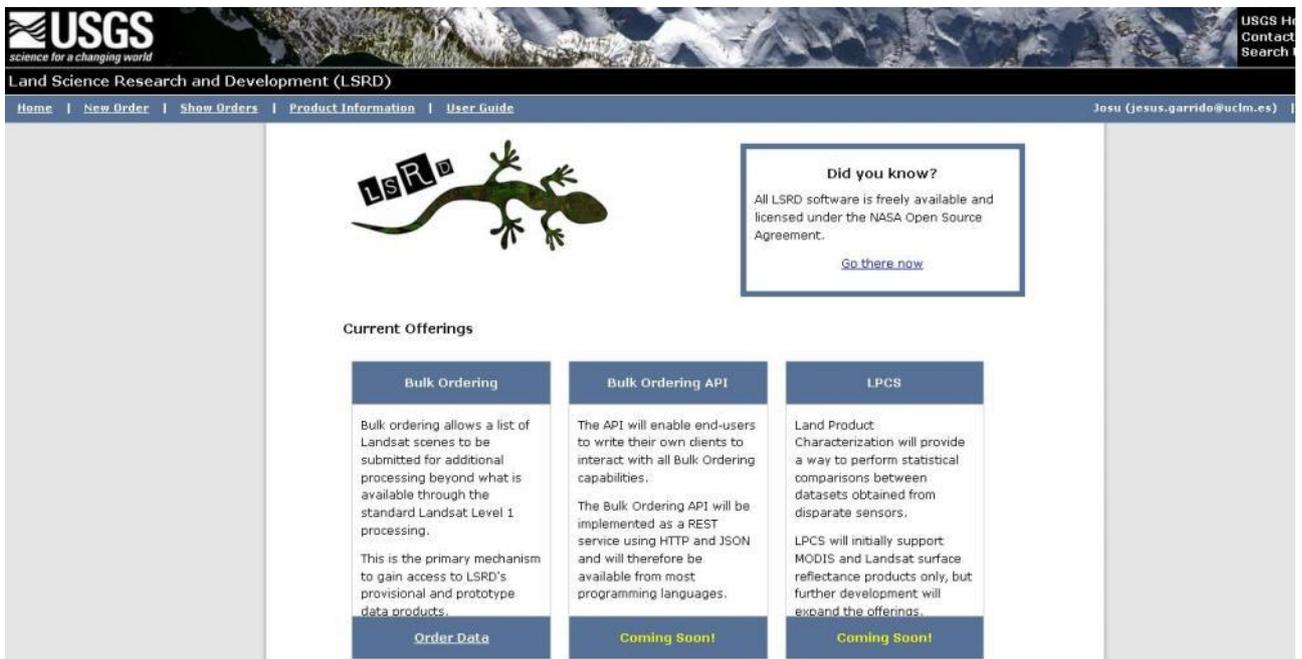


Figura 18. Web descarga masiva ESPA.

## 1.5. CORRECCIONES RADIOMÉTRICAS

Las técnicas de corrección radiométrica permiten obtener un producto que corrige los cambios en el calibrado del sensor, así como los cambios en los ángulos de iluminación y observación. La aplicación de estas técnicas conduce a productos de reflectividad y NDVI, que se suelen denominar “en el techo de la atmósfera”, ToA, en sus siglas en inglés, “*Top of Atmosphere*”.

Para comparar imágenes de diferentes sensores y/o multitemporales, la utilización de la reflectividad ToA en vez de las radiancias presenta tres ventajas esenciales (Chander et al., 2009). Primero elimina el “efecto coseno” de los diferentes ángulos solares cenitales de iluminación para los diferentes momentos de la adquisición de la escena. Segundo, las reflectividades ToA compensan las diferencias de la irradiancia solar exoatmosférica como consecuencia de las diferencias en las bandas espectrales. Tercero, la reflectividad ToA corrige la variación en la distancia Tierra-Sol entre diferentes fechas.

La radiación electromagnética que llega al sensor es almacenada como cuentas o números digitales, ND, su conversión en radiancia recibida por el sensor en la banda  $\lambda$ ,  $L_\lambda$ , implica la conversión en una magnitud física conocida (Eq. 1). Los coeficientes de calibrado dependen de las características de cada sensor y vienen recogidos en los metadatos de las imágenes y en la literatura especializada, aunque los valores dependen del tipo de pre-procesamiento. El uso de los coeficientes de calibrado adecuados, permite reducir o minimizar aquellos cambios que se deben intrínsecamente al sensor y a su óptica.

Eq. 1

$$L_\lambda = G_{\text{rescalado}} \cdot ND + B_{\text{rescalado}}$$

Donde:

$L_\lambda$ : radiancia espectral captada por el sensor en la banda  $\lambda$ ,  $W/(m^2 \text{ sr } \mu\text{m})$ .

Grescalado: Factor de rescalado de la banda del sensor,  $[W/(m^2 \text{ sr } \mu\text{m})]/ND$ .

ND: número digital captado por el sensor

Brescalado: Factor de rescalado de la banda del sensor,  $W/(m^2 \text{ sr } \mu\text{m})$ .

A pesar de que  $L_\lambda$  es una magnitud física conocida y cuantificable no depende exclusivamente de las propiedades de la cubierta. En consecuencia se trabaja para convertir  $L_\lambda$  en una magnitud comparable como es la reflectividad de la cubierta en la banda  $\lambda$  captada por el sensor,  $\rho_\lambda$  (Eq. 2). Esta ecuación no tiene en cuenta la presencia de la atmósfera.

Eq. 2

$$\rho_\lambda = \frac{\pi \cdot L_\lambda \cdot d^2}{ESUN_\lambda \cdot \cos\theta_s}$$

Donde:

$\rho_\lambda$ : Reflectividad captada por el sensor en la banda  $\lambda$ , sin unidades.

$\pi$ : Constante matemática.

$L\lambda$ : radiancia espectral captada por el sensor en la banda  $\lambda$ ,  $W/(m^2 \text{ sr } \mu\text{m})$ .

$d$ : distancia de la tierra al sol, unidades astronómicas.

$ESUN\lambda$ : radiancia solar extraterrestre en la banda  $\lambda$ ,  $W/(m^2 \mu\text{m})$ .

$\cos\theta_s$ : coseno del ángulo cenital solar.

## 1.6. CORRECCIONES ATMOSFÉRICAS

Los métodos de corrección atmosférica pretenden eliminar o compensar los efectos atmosféricos sobre la imagen obteniendo así una señal en superficie comparable para áreas y fechas de adquisición diferentes. De esta forma obtendremos Reflectividades BoA (por sus siglas en Inglés de “*Bottom of Atmosphere*”).

La corrección atmosférica adoptada es un método de corrección relativa que basa la corrección de las series de imágenes en una imagen que se considera como referencia. La reflectividad de cada banda del sensor es corregida en función de superficies consideradas invariantes (Schroeder et al., 2006), o los índices de vegetación son corregidos en base a esas superficies (Chen et al., 2005). Este método se basa por tanto en que es posible encontrar superficies en la imagen cuyo índice de vegetación es invariante en el tiempo y que dichas superficies exhiben un rango de valores de índices de vegetación que abarque una gama dinámica adecuada. El índice de vegetación de dichas superficies invariantes debe ser conocido.

Las mejores superficies IV-invariantes son: suelo desnudo y vegetación muy densa, que a su vez presentan la gran ventaja de representar los dos extremos del rango dinámico de valores de índice de vegetación para la superficie terrestre. Los valores obtenidos se toman como patrón y en base a ellos se procede a la normalización de las imágenes.

## 1.7. PROCESADO DE NDVI

Los *índices de vegetación* se pueden definir como combinaciones de bandas espectrales, cuyo objetivo es el de realzar la contribución de la vegetación fotosintéticamente activa en la respuesta espectral de una superficie y atenuar la de otros factores como el suelo en el que se asienta, las condiciones de iluminación solar, restos de vegetación seca y la atmósfera. El índice de vegetación por diferencias normalizado, NDVI, definido por la Eq. 3 (Rouse et al., 1973) es, con mucho, el índice de vegetación más usado en las aplicaciones de la Teledetección

Eq. 3

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

Donde:

NIR es la reflectividad en el infrarrojo cercano, y R es la reflectividad en el rojo, en el ancho de banda correspondiente a cada banda. En Landsat 8, las bandas del rojo e infrarrojo cercano, corresponden a las bandas 4 y 5 respectivamente.

Resaltar que el NDVI es el índice de vegetación sobre el que más experiencia se ha acumulado en la descripción de parámetros biofísicos de la cubierta vegetal, lo que constituye un argumento adicional en su favor como índice adoptado. Por otro lado, sus valores oscilan entre -1 y +1, lo que ayuda en su interpretación. El NDVI presenta las ventajas de una gran sencillez de cálculo, facilita la interpretación directa de los parámetros biofísicos del cultivo, dada la gran cantidad de experiencia acumulada en su uso, y permite, por tanto, la comparación entre datos obtenidos. Así pues, combinando la reflectividad en las bandas del rojo e infrarrojo cercano, se calcula un mapa de NDVI combinando algebraicamente las bandas según la ecuación Eq. 3. Operando de esta forma, para cada fecha de la que dispongamos de imagen podemos disponer de mapa de NDVI, con lo que finalmente podríamos disponer de una secuencia temporal de mapas de NDVI.

### 1.8. PROCESADO DE RGB

Las combinaciones color, generalmente llamadas RGB, es un importante instrumento que permite el análisis visual de la dinámica de las superficies estudiadas. Por tanto se presta especial atención a la generación de combinaciones fácilmente interpretables y comparables en el tiempo. La combinación propuesta es la adecuada para la monitorización de la vegetación y de las prácticas agrícolas. Utiliza la banda espectral del infrarrojo medio (B6) en el canal del rojo, la banda espectral del infrarrojo cercano (B5) en el canal del verde y la banda espectral del rojo (B4) en el canal del azul. Esta combinación es fácilmente interpretable puesto que permite distinguir la vegetación fotosintéticamente activa (colores verdes brillantes), el suelo desnudo (colores ocres) y la vegetación natural (verde oscuro).

Las imágenes de color RGB están obtenidas a 15 m de resolución espacial tras un proceso de fusión. Las combinaciones RGB obtenidas se procesan para obtener una visualización adecuada sin necesidad de aplicar ninguna modificación posterior del histograma.

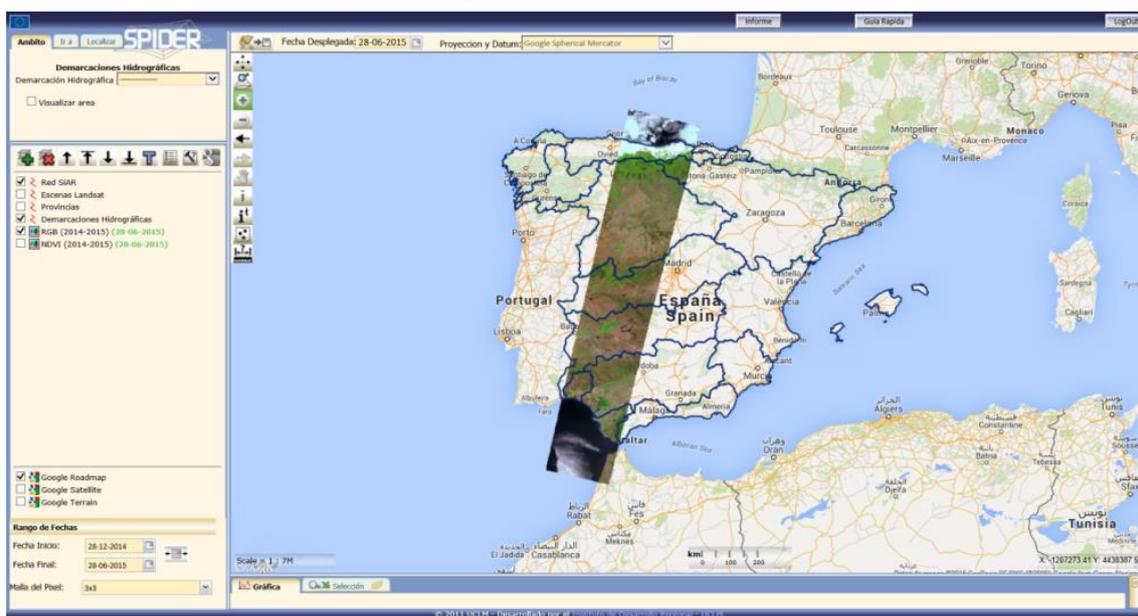


Figura 19. Combinación color Landsat 8 RGB 654 visualizada en el sistema SPIDERwebGIS®.

### 1.9. PROCESADO DE LA MÁSCARA DE NUBES/SOMBRA

La detección de nubes, y de las sombras asociadas, es uno de los retos para el aprovechamiento efectivo de las imágenes de satélite en la observación de la superficie terrestre. Procesos como la clasificación de usos de suelo o la obtención de variables biofísicas y, en general, las aplicaciones en las que se utilicen series multitemporales de imágenes, requieren de la previa detección y eliminación de las nubes y sus sombras. Por ello, se ha generado un procesado que las detecte y elimine de las imágenes NDVI. En consecuencia, la monitorización de las superficies de regadío y la estimación de sus necesidades hídricas presentará un menor número de píxeles con información inválida. La cadena de procesado creada para eliminar las nubes y sombras de la imagen se muestra en la Figura 20, mientras que en la siguiente tabla se muestran las entradas y las salidas del modelo.

En resumen, la metodología consiste en emplear la banda de calidad que Landsat 8 trae para cada imagen capturada y extraer los píxeles contaminados por nubes. Seguidamente, con la imagen combinación color se detectan las sombras producidas por las nubes. Una vez identificados los píxeles con presencia de nubes o sombras se unen para crear una máscara. Esta máscara final, se aplica a la imagen NDVI para eliminar aquellos píxeles contenidos en ella. Es necesario aclarar que el modelo sólo es aplicable en las imágenes capturadas por el satélite Landsat 8 ya que cada imagen contiene una banda de calidad.

Tabla 7. Entradas y salidas del modelo máscara de nubes.

Inputs	Outputs
<b>Banda Quality Assessment (BQA)</b>	Tabla (*.tbl)
<b>Imagen RGB 654 (30x30m)</b>	Máscara de nubes/sombras (mns)
<b>Imagen NDVI BoA 0-200 (30x30m)</b>	NDVI BoA 0-200 mns (30x30m)

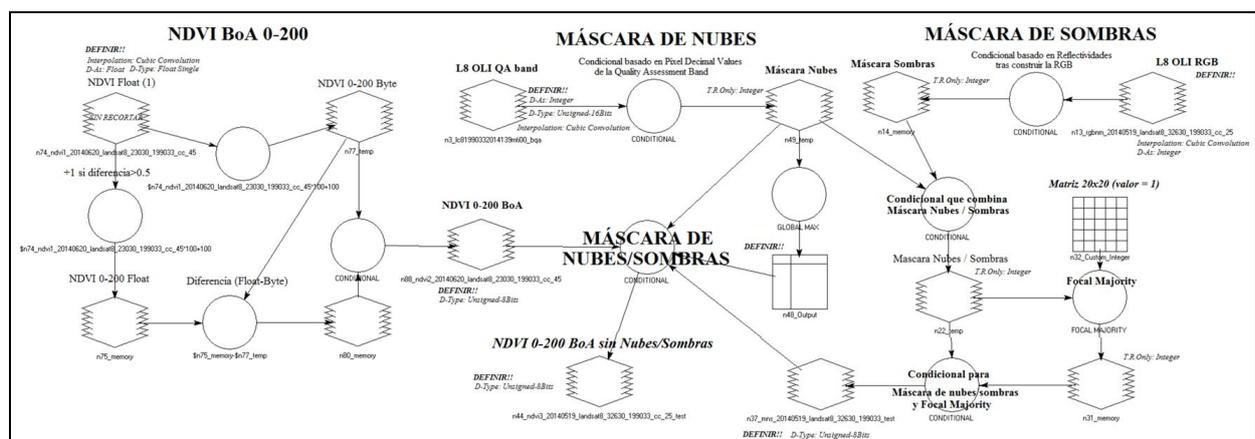


Figura 20. Cadena de procesado Máscara de Nubes/Sombras

El procesado de nubes/sombras presenta varias etapas:

- a) máscara de nubes;
- b) máscara de sombras;
- c) combinación máscara de nubes/sombras (mns); y
- d) aplicación de la mns al NDVI.

### 1.9.1. Máscara de nubes

Para obtener la máscara de nubes se utiliza la banda de calidad que incorpora las imágenes de Landsat 8, llamada QA Band (*Quality Assessment*). A esta banda se aplica un condicional, de manera que los píxeles (*pixel Decimal Values*) que incorpora con una alta probabilidad de nubes y cirros son clasificados como nubes. Finalmente, la imagen QA Band es reclasificada. En consecuencia, se asigna a los píxeles de nubes el valor 2, mientras que el valor 1 se asigna zonas sin nubes, y el valor 0 se asigna a la zona exterior sin valores.

Resaltar que los resultados en la determinación están fuertemente influenciados por la tipología de nubes siendo más precisos en su extensión y delimitación cuando las nubes presentan una estructura más definida. Destacar que la máscara de nubes y sombras no se aplicará a las imágenes que no contengan nubes. La forma en la que el procesado detecta o no la presencia de nubes es mediante la creación de una tabla con el proceso *Global Max* en ERDAS. Este proceso busca el mayor valor presente en la máscara de nubes y lo escribe en dicha tabla. En consecuencia, esta tabla sólo puede contener dos valores posibles: 1, cuando la imagen no contiene nubes; o 2, cuando la imagen contiene nubes.

**Tabla 8.** Máscara de nubes.

Valor reclasificado	Decimal Pixel Value (BQA L8 OLI)
2	61440, 59242, 57344, 56320, 53248, 52256, 52224, 49184, 49152, 48128, 45056, 43040, 39936, 36896, 36864, 32768, 31744, 28672, 26656 y 24576
1	El resto de <i>pixel decimal values</i> salvo valor 1
0	1 (zona exterior de la imagen sin valores)

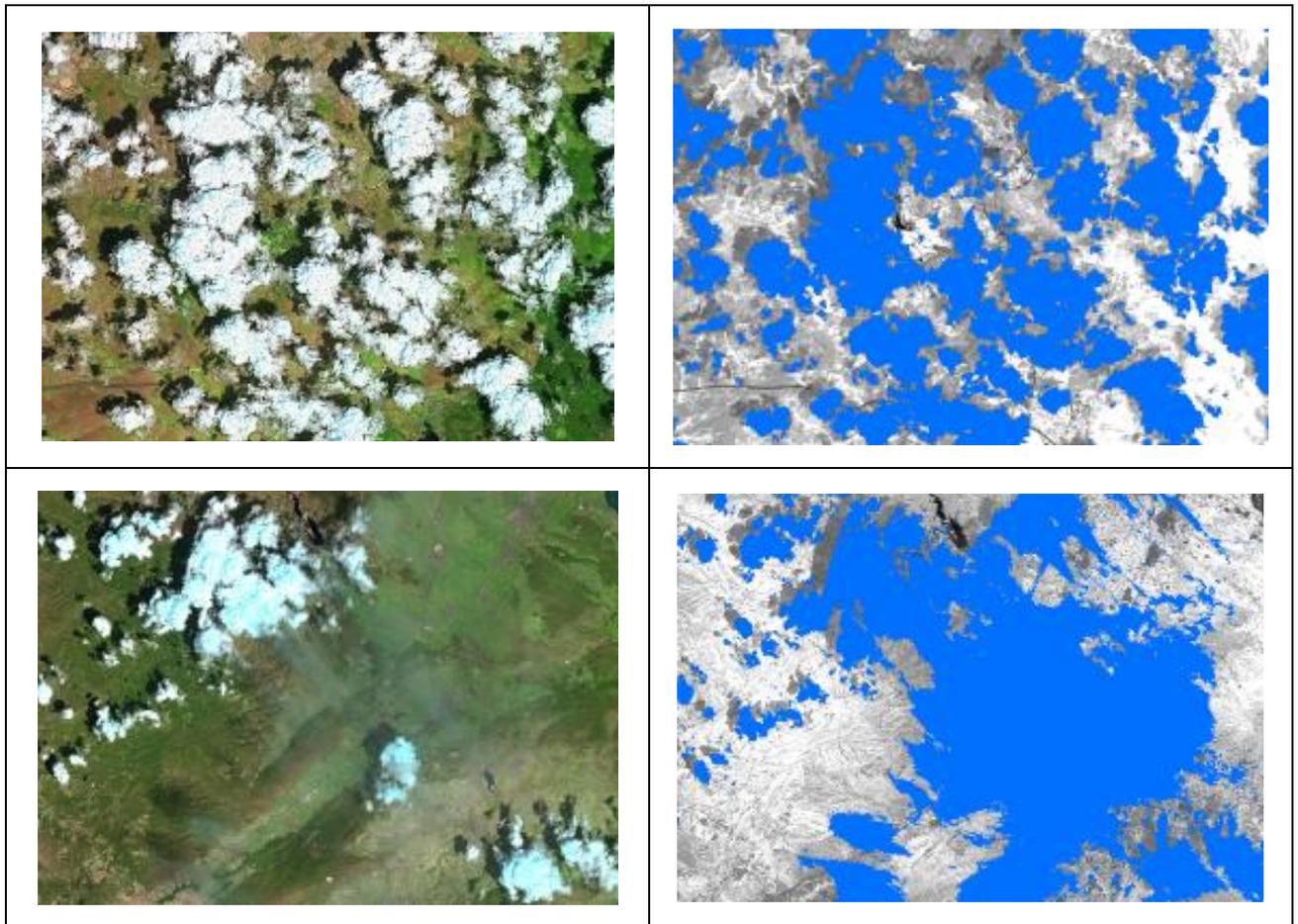


Figura 21. Máscara de nubes generada

### 1.9.2. Máscara de sombras

Las sombras son detectadas por el ojo humano con facilidad por predominar los colores oscuros en esas superficies. Por consiguiente, para obtener la máscara de sombras se aplica un condicional a las 3 bandas de reflectividades empleadas en la construcción de la imagen RGB. La respuesta espectral de las sombras está ligada a una menor radiación incidente sobre dichas superficies en sombra. Por ello, las reflectividades máximas en las que está basada la regla de identificación de sombras en cada banda son las siguientes:

$$\rho_{SWIR} \leq 0.1; \rho_{NIR} \leq 0.15; \text{ y } \rho_R \leq 0.08$$

En la imagen RGB los anteriores valores equivalen a 40, 60 y 40 respectivamente ya que las bandas 6,5 y 4 de la RGB están multiplicadas por 400, 400 y 500 respectivamente. En la siguiente imagen se observa la construcción de la máscara de sombras en el módulo *Model Maker* del programa ERDAS.

$$CONDITIONAL \{((rgbmn(1) \leq 40) \& (rgbmn(2) \leq 60) \& (rgbmn(3) \leq 40))0, (rgbmn(1))1\}$$

Así, obtenemos una nueva imagen compuesta de 0 y 1 según haya detectado sombras o no. Los resultados en la determinación están de nuevo fuertemente influenciados por la tipología de las nubes y la fecha del año obteniendo los mejores resultados cuando las nubes están bien definidas estructuralmente y son densas en su composición.

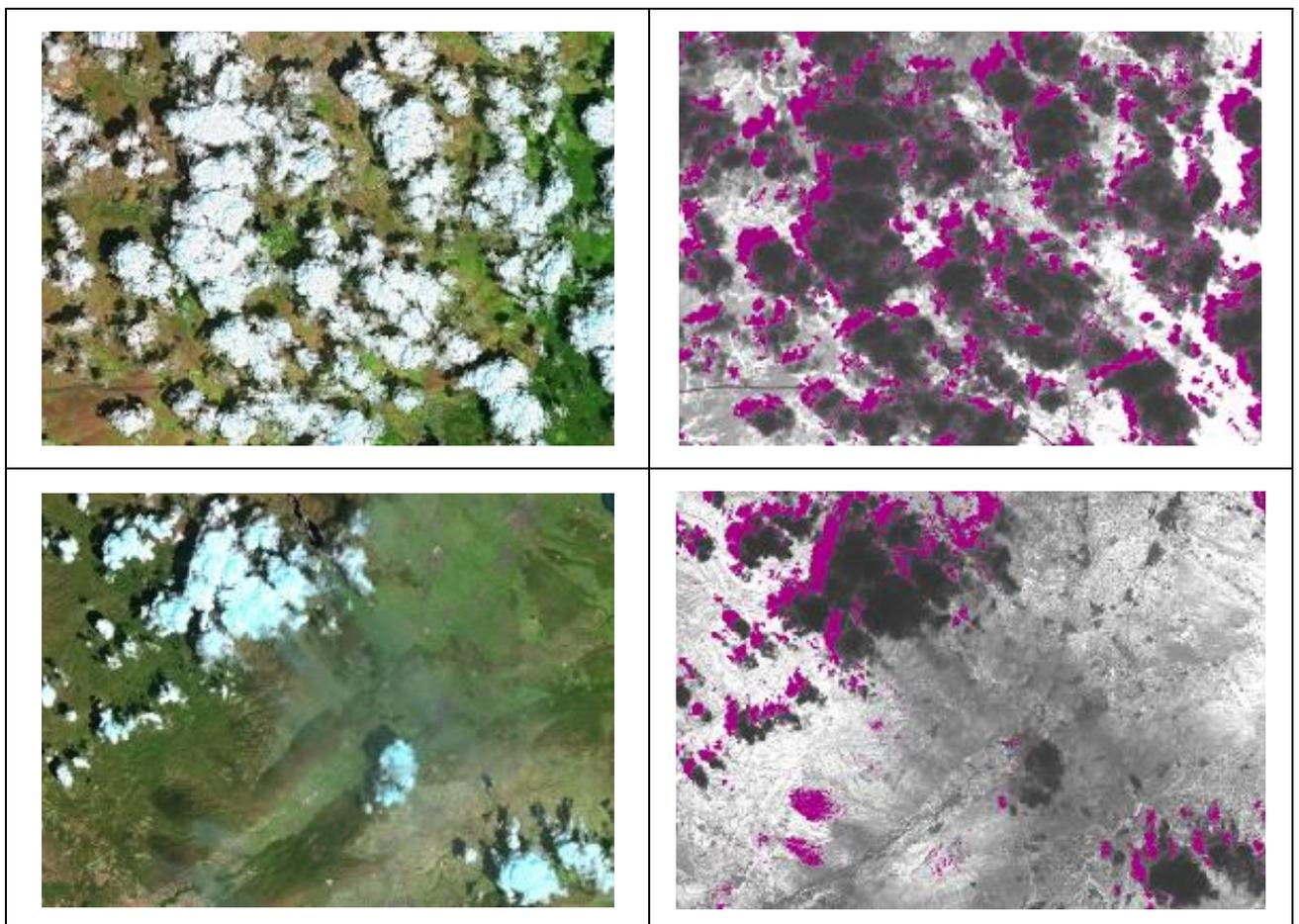


Figura 22. Máscara de sombras generada

### 1.9.3. Combinación de máscara de nubes y sombras (mns)

Se trata de sumar ambos resultados de la máscara de nubes y de la máscara de sombras para obtener una única imagen a modo de máscara. Sin embargo, antes hay un paso intermedio por el cual se pretende rellenar posibles huecos que hayan quedado sin identificar como nube o sombra, mediante la herramienta *focal majority* del programa ERDAS. De esta forma se construye una máscara de nubes y sombras.

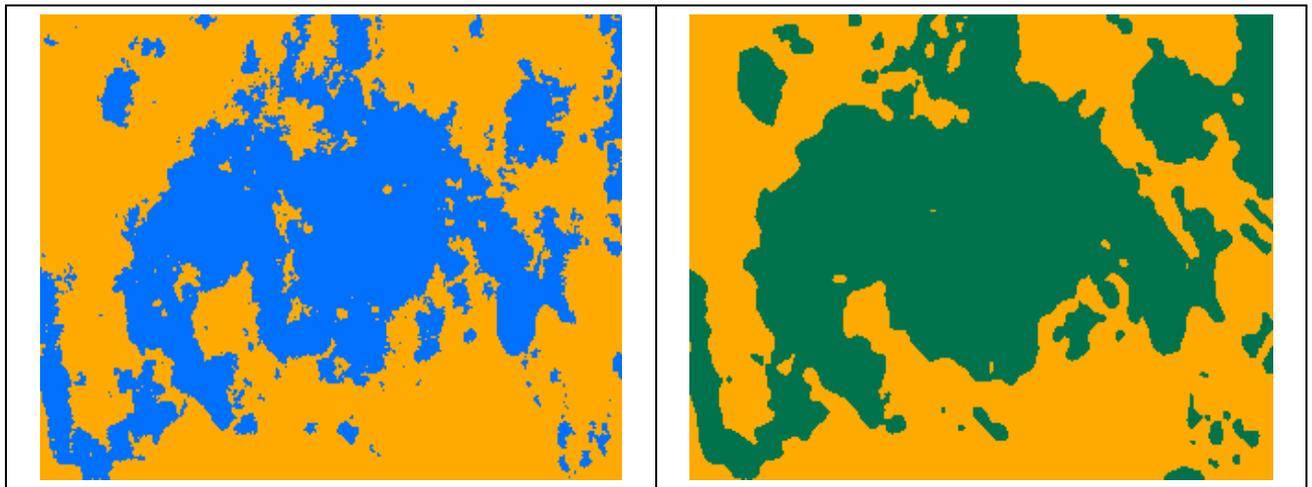
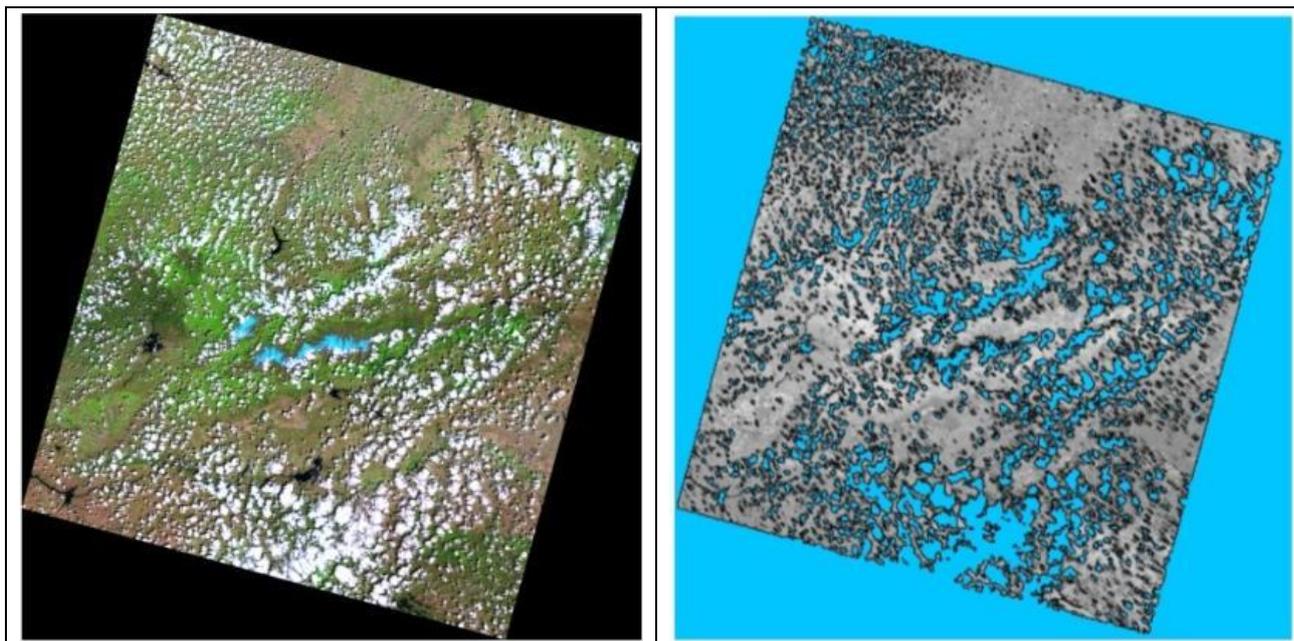


Figura 23. Máscara de nubes y sombras combinada

### 1.9.4. Aplicación de la máscara de nubes y sombras a la imagen NDVI

Se trata de combinar la máscara de nubes y sombras con la imagen NDVI corregida atmosféricamente (BoA). En consecuencia, si el proceso ha detectado que la imagen contiene nubes, la máscara se aplica a la imagen NDVI. El resultado final es una imagen NDVI BoA con valores de 0-200 donde se han eliminado las nubes y el exterior de la imagen (píxeles con valor 0) para poder ser empleada en HidroMORE.



**Figura 24.** Aspecto final de la máscara de nubes y sombras combinada en toda una imagen

#### 1.10. PROCESADO DE IMÁGENES COEFICIENTE BASAL DE CULTIVO (Kcb)

La generación de imágenes denominadas coeficiente basal de cultivo es otro de los productos básicos que se obtienen mediante el procesado de las imágenes de satélite. Para su generación se emplean relaciones lineales con los índices de vegetación obtenidos desde imágenes de satélite, ya demostradas y validadas en numerosos cultivos desde que en 1989 se publicase el primer estudio que relacionaba el Kcb con el NDVI (NDVI-Kcb). Resaltar que las imágenes Kcb obtenidas se basan en las imágenes NDVI tras aplicar la máscara de nubes y sombras. Su construcción está basada en la Eq. 4 (Campos et al., 2010d).

Eq. 4                       $Kcb = 1.44 \cdot NDVI - 0.1$

### 1.11. DETALLE DE LAS IMÁGENES PROCESADAS EN FECHAS Y PRODUCTOS

El número total de imágenes procesadas, entre Landsat 8 y Spot 5 es de 1155. En cuanto al satélite Landsat 8 se han procesado un total de 37 escenas diferentes, mientras que en relación al satélite Spot 5 se han trabajado un total de 4 escenas diferentes. En detalle, para el año 2014 se han procesado 477 imágenes Landsat 8, mientras que 678 fueron procesadas en 2015 (584 Landsat 8 y 94 Spot 5). En la siguiente tabla se muestran en detalle las imágenes procesadas. Destacar, que el número total de productos procesados es superior al número total de imágenes procesadas, ya que tal y como se ha explicado a lo largo de este anejo, 3 son los productos básicos generados: imágenes NDVI, imágenes RGB e imágenes Kcb.

**Tabla 9.** Resumen de las imágenes procesadas.

Año	RGB (Landsat 8)	NDVI (Landsat 8)	Kcb (Landsat 8)	RGB (Spot 5)	NDVI (Spot 5)	Kcb (Spot 5)
<b>2014</b>	477	477	477	-	-	-
<b>2015</b>	584	584	584	94	94	94

En la siguiente figura se aprecia la distribución del número de imágenes según escena Landsat y año de estudio. Además, en las siguientes tablas se detallan las imágenes Landsat 8 procesadas por fecha y escena.

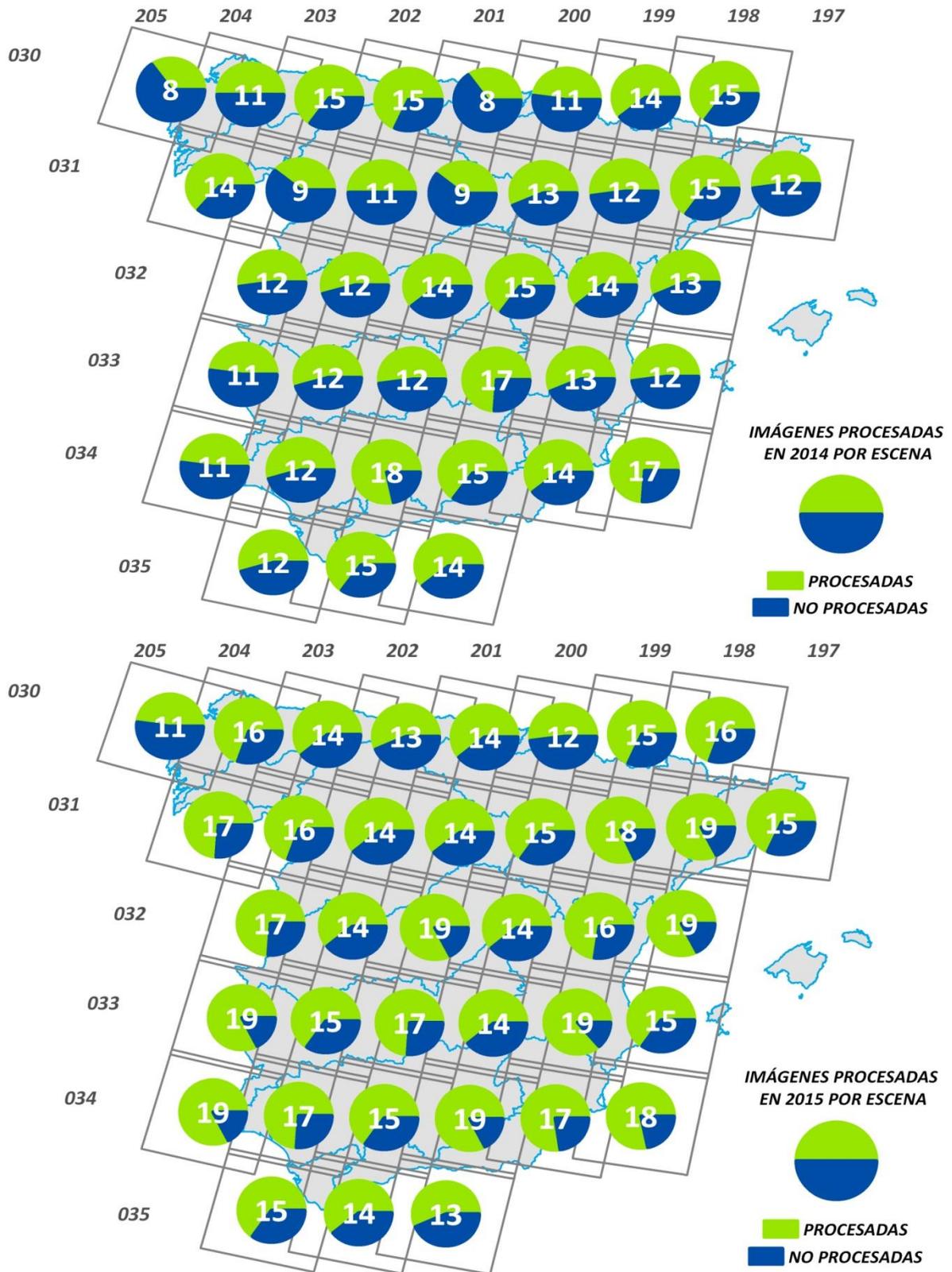


Figura 25. Número de imágenes Landsat 8 procesadas por escenas Landsat en 2014 y 2015.

**Tabla 10.** Detalle del número de imágenes Landsat procesadas por escena y por mes del 2014.

Número de imágenes de satélite Landsat 8 procesadas en 2014 por mes												
Escena	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
197-031	1	1	2		1		2	1	2		1	1
198-030				1		1	2		1	2	1	1
198-031	1	1	1	1		2	2	1	1	2	1	2
198-032	1		1	1		2	2		1	2	1	2
198-033	1		1	1		2	2		1	2		2
198-034				1		2	2		1	2		1
199-030				1	2	1	1	2	1	1		1
199-031	1	1	1		2	1	1	2	1	1		1
199-032	1	1	1	1	2	2	1	2	1	1		1
199-033		1	1	1	2	2	1	2	1	1		1
199-034	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1		1
200-030			1		1	2	2		1	2	1	
200-031		1	1	1	1	2	2	1	1	2		1
200-032		1	2	1	2	2	2	1		1	1	1
200-033		1	2	1	2	2	2	2	1	1	2	1
200-034		1	2	2	2	1	2	1	1	1	1	1
200-035		1	2	2	2	1	2	1		1	1	1
201-030			1		1	2		2	1	1		
201-031			1		1	2		2	1	1		1
201-032	1	1		1	2	2	2	2		1	1	1
201-033	1				1	2	2	2		2		2
201-034	1	2		1	2	2	2	2	1	2	1	2
201-035	1	1		1	1	2	2	2	1	2	1	1
202-030				1	1	1	2	1	2	1		1
202-031	1		1	1		1	2	2	1	1		1
202-032			1	1	1	1	2	2	1	1		2
202-033			1	1	1	2	2	2	1	1		1
202-034				1	1	1	2	2	1	1	1	2
202-035				1	1	1	2	2	1	1	1	2
203-030				1	1	1		1	2	1	1	1
203-031	1		1	1	1	1		1	1	1		1
203-032	1		1	1	2	1		1	1	2		2
203-033	1		1		2	1		1	1	2		2
203-034	1		1	1	2	1	1	1	1	2		2
204-030					1	1	2		2		2	
204-031					1	1	2		1	1	1	
205-030			1	1	1	1	1	1	1	1		

**Tabla 11.** Detalle del número de imágenes Landsat procesadas por escena y por mes del 2015.

Número de imágenes de satélite Landsat 8 procesadas en 2015 por mes												
Escena	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
197-031		1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2
198-030	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2
198-031	1	2	2	1	2	1	2	2	1	2	2	1
198-032	1	2	2	2	2	1	1	2	1	2	2	1
198-033		2	2	1	2	1	1	1	1	2	2	
198-034		2	2	1	2	1	1	2	2	2	2	1
199-030	1			1	2	2	1	2	2	1	2	1
199-031	1		1	2	2	2	2	2	2	1	2	1
199-032	1			2	2	2	1	2	2	1	2	1
199-033	2		1	1	2	2	2	2	2	2	2	1
199-034			1	2	1	2	2	1	2	2	2	1
200-030	1		1	1	1	2	1		1		2	2
200-031	1	1	1	1	1	2	1	2	1		2	2
200-032	2	1	1	1		1	1	2	2		2	1
200-033	1	2	1		1	1	1	2	2		2	1
200-034	2	2	2	1	2	1	1	2	2		2	2
200-035	1	2	1		1	1	1	2	2		2	
201-030	1		1	1		2	2	2	2	1	1	1
201-031	1		1	1	1	2	2	2	2		2	
201-032	2	1	1	2	1	2	2	2	2	1	2	1
201-033	2	1		2	1	2	2	2	2	1	2	1
201-034	1	1		1	2	2	2	2	1	1	2	1
201-035	1	1		1	1	2	2	2	2		2	1
202-030	1		2		2	1	1		1	2	1	2
202-031	2		2		2	1	2		1	2	1	2
202-032	2		1		2	1	2	2		1	1	2
202-033	2	1	1		2	2	2	1		1	1	2
202-034	2	2	2		2	1	2	1		1	2	2
202-035	2	2	1		2	1	2	1		1	1	2
203-030		1	1		1	2	2	2	2	1	1	1
203-031	2	1	2		1	2	1	2	2	1	2	
203-032	2	1	2		1	2	1	2	2	1	2	1
203-033	2	1	2	1	1	2	2	2	2	1	2	1
203-034	2	1	2	1	1	2	2	2	2	1	2	1
204-030	1	1	2	2	2	1	2	1	1		1	2
204-031	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2
205-030		1	1		1	1	1	2	2	1	1	

**Tabla 12.** Imágenes Landsat procesadas por escenas 2014.

Escenas	Imágenes 2014 (aaaammdd, año mes y día)
<b>197031</b>	20140129, 20140214, 20140302, 20140318, 20140505, 20140708, 20140724, 20140825, 20140910, 20140926, 20141113, 20141231
<b>198030</b>	20140410, 20140613, 20140715, 20140731, 20140901, 20141003, 20141019, 20141120, 20141222
<b>198031</b>	20140104, 20140205, 20140309, 20140410, 20140613, 20140629, 20140715, 20140731, 20140816, 20140901, 20141003, 20141019, 20141120, 20141206, 20141222,
<b>198032</b>	20140104, 20140309, 20140410, 20140613, 20140629, 20140715, 20140731, 20140901, 20141003, 20141019, 20141120, 20141206, 20141222
<b>198033</b>	20140120, 20140309, 20140410, 20140613, 20140629, 20140715, 20140731, 20140901, 20141003, 20141019, 20141206, 20141222
<b>198034</b>	20140410, 20140613, 20140629, 20140715, 20140731, 20140901, 20141003, 20141019, 20141206
<b>199030</b>	20140417, 20140503, 20140519, 20140620, 20140722, 20140807, 20140823, 20140908, 20141026, 20141229
<b>199031</b>	20140127, 20140212, 20140316, 20140503, 20140519, 20140620, 20140722, 20140807, 20140823, 20140908, 20141026, 20141229
<b>199032</b>	20140127, 20140212, 20140316, 20140417, 20140503, 20140519, 20140604, 20140620, 20140722, 20140807, 20140823, 20140908, 20141026, 20141229
<b>199033</b>	20140212, 20140316, 20140417, 20140503, 20140519, 20140604, 20140620, 20140722, 20140807, 20140823, 20140908, 20141026, 20141229
<b>199034</b>	20140127, 20140212, 20140316, 20140417, 20140503, 20140519, 20140604, 20140620, 20140722, 20140807, 20140908, 20140924, 20141026, 20141229
<b>200030</b>	20140307, 20140510, 20140611, 20140627, 20140713, 20140729, 20140915, 20141001, 20141017, 20141118
<b>200031</b>	20140219, 20140307, 20140408, 20140510, 20140611, 20140627, 20140713, 20140729, 20140814, 20140915, 20141001, 20141017, 20141220
<b>200032</b>	20140219, 20140307, 20140323, 20140408, 20140510, 20140526, 20140611, 20140627, 20140713, 20140729, 20140814, 20140830, 20141017, 20141118, 20141220
<b>200033</b>	20140219, 20140307, 20140323, 20140408, 20140510, 20140526, 20140611, 20140627, 20140713, 20140729, 20140814, 20140830, 20140915, 20141017, 20141102, 20141118, 20141220
<b>200034</b>	20140219, 20140307, 20140323, 20140408, 20140424, 20140510, 20140526, 20140627, 20140713, 20140729, 20140814, 20140915, 20141017, 20141118, 20141220
<b>200035</b>	20140219, 20140307, 20140323, 20140408, 20140424, 20140510, 20140526, 20140627, 20140713, 20140729, 20140814, 20141017, 20141118, 20141220
<b>201030</b>	20140314, 20140517, 20140602, 20140618, 20140805, 20140821, 20140906, 20141024
<b>201031</b>	20140314, 20140517, 20140602, 20140618, 20140805, 20140821, 20140906, 20141024, 20141211

Escenas	Imágenes 2014 (aaaammdd, año mes y día)
<b>201032</b>	20140125, 20140210, 20140415, 20140501, 20140517, 20140602, 20140618, 20140704, 20140720, 20140805, 20140821, 20141024, 20141109, 20141211
<b>201033</b>	20140501, 20140517, 20140602, 20140618, 20140704, 20140720, 20140805, 20140821, 20141008, 20141024, 20141211, 20141227
<b>201034</b>	20140125, 20140210, 20140226, 20140415, 20140501, 20140517, 20140602, 20140618, 20140704, 20140720, 20140805, 20140821, 20140906, 20141008, 20141024, 20141109, 20141211, 20141227
<b>201035</b>	20140125, 20140226, 20140415, 20140501, 20140602, 20140618, 20140704, 20140720, 20140805, 20140821, 20140906, 20141008, 20141024, 20141109, 20141227
<b>202030</b>	20140406, 20140508, 20140625, 20140711, 20140727, 20140828, 20140913, 20140929, 20141031, 20141218
<b>202031</b>	20140201, 20140305, 20140406, 20140609, 20140711, 20140727, 20140812, 20140828, 20140913, 20141031, 20141202
<b>202032</b>	20140305, 20140406, 20140524, 20140625, 20140711, 20140727, 20140812, 20140828, 20140913, 20141031, 20141202, 20141218
<b>202033</b>	20140305, 20140406, 20140508, 20140609, 20140625, 20140711, 20140727, 20140812, 20140828, 20140913, 20141031, 20141202
<b>202034</b>	20140406, 20140508, 20140609, 20140711, 20140727, 20140812, 20140828, 20140929, 20141031, 20141116, 20141202, 20141218
<b>202035</b>	20140406, 20140508, 20140609, 20140711, 20140727, 20140812, 20140828, 20140929, 20141031, 20141116, 20141202, 20141218
<b>203030</b>	20140413, 20140515, 20140616, 20140819, 20140904, 20140920, 20141022, 20141107, 20141209
<b>203031</b>	20140123, 20140312, 20140413, 20140515, 20140616, 20140819, 20140904, 20141006, 20141022
<b>203032</b>	20140123, 20140312, 20140413, 20140515, 20140531, 20140616, 20140819, 20140904, 20141006, 20141022, 20141209, 20141225
<b>203033</b>	20140123, 20140312, 20140515, 20140531, 20140616, 20140819, 20140904, 20141006, 20141022, 20141209, 20141225
<b>203034</b>	20140123, 20140312, 20140413, 20140531, 20140616, 20140718, 20140819, 20140904, 20141022, 20141209, 20141225
<b>204030</b>	20140522, 20140623, 20140709, 20140725, 20140911, 20140927, 20141114, 20141130
<b>204031</b>	20140522, 20140623, 20140709, 20140725, 20140927, 20141029, 20141130
<b>205030</b>	20140310, 20140411, 20140513, 20140614, 20140716, 20140817, 20140902, 20141020

**Tabla 13.** Imágenes Landsat procesadas por escenas 2015.

Escenas	Imágenes 2015 (aaaammdd, año mes y día)
<b>197031</b>	20150201, 20150305, 20150406, 20150508, 20150609, 20150625, 20150711, 20150812, 20150828, 20150913, 20151015, 20151031, 20151116, 20151202, 20151218
<b>198030</b>	20150107, 20150208, 20150312, 20150413, 20150531, 20150616, 20150702, 20150718, 20150803, 20150819, 20150920, 20151006, 20151123, 20151209, 20151225
<b>198031</b>	20150107, 20150208, 20150224, 20150312, 20150328, 20150413, 20150515, 20150531, 20150616, 20150702, 20150718, 20150803, 20150819, 20150920, 20151006, 20151022, 20151107, 20151123, 20151209
<b>198032</b>	20150107, 20150208, 20150224, 20150312, 20150328, 20150413, 20150429, 20150515, 20150531, 20150616, 20150718, 20150803, 20150819, 20150920, 20151006, 20151022, 20151107, 20151123, 20151209
<b>198033</b>	20150208, 20150224, 20150312, 20150328, 20150429, 20150515, 20150531, 20150616, 20150718, 20150803, 20150920, 20151006, 20151022, 20151107, 20151123
<b>198034</b>	20150208, 20150224, 20150312, 20150328, 20150429, 20150515, 20150531, 20150616, 20150718, 20150803, 20150819, 20150904, 20150920, 20151006, 20151022, 20151107, 20151123, 20151209
<b>199030</b>	20150114, 20150420, 20150506, 20150522, 20150607, 20150623, 20150709, 20150810, 20150826, 20150911, 20150927, 20151029, 20151114, 20151130, 20151216
<b>199031</b>	20150114, 20150303, 20150404, 20150420, 20150506, 20150522, 20150607, 20150623, 20150709, 20150725, 20150810, 20150826, 20150911, 20150927, 20151029, 20151114, 20151130, 20151216
<b>199032</b>	20150114, 20150404, 20150420, 20150506, 20150522, 20150607, 20150623, 20150709, 20150810, 20150826, 20150911, 20150927, 20151029, 20151114, 20151130, 20151216
<b>199033</b>	20150114, 20150130, 20150303, 20150420, 20150506, 20150522, 20150607, 20150623, 20150709, 20150725, 20150810, 20150826, 20150911, 20150927, 20151013, 20151029, 20151114, 20151130, 20151216
<b>199034</b>	20150303, 20150404, 20150420, 20150506, 20150607, 20150623, 20150709, 20150725, 20150826, 20150911, 20150927, 20151013, 20151029, 20151114, 20151130, 20151216
<b>200030</b>	20150105, 20150310, 20150411, 20150529, 20150614, 20150630, 20150716, 20150918, 20151105, 20151121, 20151207, 20151223
<b>200031</b>	20150105, 20150222, 20150310, 20150411, 20150529, 20150614, 20150630, 20150716, 20150801, 20150817, 20150918, 20151105, 20151121, 20151207, 20151223
<b>200032</b>	20150105, 20150121, 20150222, 20150310, 20150411, 20150630, 20150716, 20150801, 20150817, 20150902, 20150918, 20151105, 20151121, 20151223
<b>200033</b>	20150105, 20150206, 20150222, 20150310, 20150513, 20150630, 20150716, 20150801, 20150817, 20150902, 20150918, 20151105, 20151121, 20151223

Escenas	Imágenes 2015 (aaaammdd, año mes y día)
<b>200034</b>	20150105, 20150121, 20150206, 20150222, 20150310, 20150326, 20150427, 20150513, 20150529, 20150630, 20150716, 20150801, 20150817, 20150902, 20150918, 20151105, 20151121, 20151207, 20151223
<b>200035</b>	20150105, 20150206, 20150222, 20150310, 20150513, 20150630, 20150716, 20150801, 20150817, 20150902, 20150918, 20151105, 20151121
<b>201030</b>	20150112, 20150317, 20150402, 20150605, 20150621, 20150707, 20150723, 20150808, 20150824, 20150909, 20150925, 20151011, 20151112, 20151214
<b>201031</b>	20150112, 20150317, 20150402, 20150520, 20150605, 20150621, 20150707, 20150723, 20150808, 20150824, 20150909, 20151112, 20151128
<b>201032</b>	20150112, 20150128, 20150213, 20150301, 20150402, 20150418, 20150520, 20150605, 20150621, 20150707, 20150723, 20150808, 20150824, 20150909, 20150925, 20151027, 20151112, 20151128, 20151230
<b>201033</b>	20150112, 20150128, 20150213, 20150402, 20150418, 20150520, 20150605, 20150621, 20150707, 20150723, 20150808, 20150824, 20150909, 20150925, 20151027, 20151112, 20151128, 20151230
<b>201034</b>	20150128, 20150213, 20150402, 20150504, 20150520, 20150605, 20150621, 20150707, 20150723, 20150808, 20150824, 20150925, 20151027, 20151112, 20151128, 20151230
<b>201035</b>	20150128, 20150213, 20150402, 20150504, 20150605, 20150621, 20150707, 20150723, 20150808, 20150824, 20150909, 20150925, 20151112, 20151128, 20151230
<b>202030</b>	20150103, 20150308, 20150324, 20150511, 20150527, 20150628, 20150714, 20150916, 20151002, 20151018, 20151119, 20151205, 20151221
<b>202031</b>	20150103, 20150119, 20150308, 20150324, 20150511, 20150527, 20150628, 20150714, 20150730, 20150916, 20151002, 20151018, 20151119, 20151205, 20151221
<b>202032</b>	20150103, 20150119, 20150308, 20150511, 20150527, 20150628, 20150714, 20150730, 20150815, 20150831, 20151002, 20151119, 20151205, 20151221
<b>202033</b>	20150103, 20150119, 20150204, 20150308, 20150511, 20150527, 20150612, 20150628, 20150714, 20150730, 20150815, 20151002, 20151119, 20151205, 20151221
<b>202034</b>	20150103, 20150119, 20150204, 20150220, 20150308, 20150324, 20150511, 20150527, 20150628, 20150714, 20150730, 20150815, 20151002, 20151103, 20151119, 20151205, 20151221
<b>202035</b>	20150103, 20150119, 20150204, 20150220, 20150308, 20150511, 20150527, 20150628, 20150714, 20150730, 20150815, 20151002, 20151119, 20151205, 20151221
<b>203030</b>	20150227, 20150331, 20150518, 20150603, 20150619, 20150705, 20150721, 20150806, 20150822, 20150907, 20150923, 20151009, 20151110, 20151212
<b>203031</b>	20150110, 20150126, 20150227, 20150315, 20150331, 20150518, 20150603, 20150619, 20150721, 20150806, 20150822, 20150907, 20150923, 20151009, 20151110, 20151126
<b>203032</b>	20150110, 20150126, 20150227, 20150315, 20150331, 20150518, 20150603,

Escenas	Imágenes 2015 (aaaammdd, año mes y día)
	20150619, 20150721, 20150806, 20150822, 20150907, 20150923, 20151009, 20151110, 20151126, 20151212
<b>203033</b>	20150110, 20150126, 20150227, 20150315, 20150331, 20150416, 20150518, 20150603, 20150619, 20150705, 20150721, 20150806, 20150822, 20150907, 20150923, 20151009, 20151110, 20151126, 20151212
<b>203034</b>	20150110, 20150126, 20150227, 20150315, 20150331, 20150416, 20150502, 20150603, 20150619, 20150705, 20150721, 20150806, 20150822, 20150907, 20150923, 20151009, 20151110, 20151126, 20151212
<b>204030</b>	20150101, 20150218, 20150306, 20150322, 20150407, 20150423, 20150509, 20150525, 20150626, 20150712, 20150728, 20150829, 20150930, 20151101, 20151203, 20151219
<b>204031</b>	20150101, 20150218, 20150306, 20150322, 20150407, 20150423, 20150509, 20150525, 20150626, 20150712, 20150728, 20150829, 20150930, 20151016, 20151101, 20151203, 20151219
<b>205030</b>	20150209, 20150313, 20150516, 20150617, 20150703, 20150804, 20150820, 20150905, 20150921, 20151023, 20151108

A continuación, la siguiente figura y tabla se especifican las imágenes Spot 5 procesadas



**Figura 26.** Representación de las zonas incluidas al procesar Spot5

**Tabla 14.** Imágenes Spot 5 procesadas por localización en 2015.

Localización	Imágenes 2015 (aaaammdd, año mes y día)
<b>Barrax (1)</b>	20150410, 20150420, 20150430, 20150510, 20150515, 20150520, 20150525, 20150609, 20150614, 20150619, 20150624, 20150629, 20150704, 20150709, 20150714, 20150719, 20150724, 20150729, 20150813, 20150823, 20150828, 20150902
<b>Valencia (2)</b>	20150410, 20150420, 20150425, 20150430, 20150510, 20150515, 20150520, 20150525, 20150604, 20150609, 20150614, 20150619, 20150624, 20150629, 20150704, 20150709, 20150714, 20150719, 20150724, 20150729, 20150813, 20150823, 20150828, 20150902, 20150912
<b>Girona (3)</b>	20150411, 20150421, 20150506, 20150511, 20150516, 20150526, 20150605, 20150610, 20150615, 20150620, 20150625, 20150630, 20150705, 20150710, 20150715, 20150720, 20150804, 20150814, 20150819, 20150824, 20150829, 20150908
<b>Madrid (4)</b>	20150419, 20150429, 20150509, 20150514, 20150519, 20150524, 20150603, 20150608, 20150618, 20150623, 20150628, 20150703, 20150708, 20150713, 20150723, 20150728, 20150807, 20150812, 20150817, 20150822, 20150901, 20150906, 20150911

## 1.12. DESARROLLO DE SOFTWARE: INTEGRACIÓN DE LOS ANTERIORES PROCESOS MANUALES EN UN SOFTWARE PARA PROCESADO AUTOMÁTICO

La generación de productos a partir de las imágenes de satélite se basa en procesos altamente repetitivos. La realización de estos procesos por un especialista requiere, además de una especialización del técnico que los realiza, de un tiempo de gestión y ejecución relativamente grande en comparación con el tiempo real de ejecución de estos procesos, que van desde unos segundos a varios minutos. Todo ello hace que sea más que interesante la automatización de dichos procesos, con la finalidad principal de ahorrar costes por imagen procesada derivados de los recursos humanos necesarios para la realización de estos procesos de forma manual. Dado que el tratamiento de las imágenes Landsat8 necesita una mínima intervención humana, principalmente para normalizar las imágenes y realizar un control de calidad de los procesos, la automatización de estos procesos se basa en dos fases, anterior y posterior a esta intervención, denominada **interfase**, y claramente diferenciadas:

En la **primera fase** (Figura 27), el tratamiento no necesita de una intervención humana. Se parte de una carpeta con los ficheros “.tar.gz” tal cual se descargan de la web en formato comprimido, y se extraen los archivos originales de cada imagen, a partir de los cuales se generan varios productos:

- Composición Color RGB (654) a 30 m, previo cálculo y reescalado de los valores de las reflectividades de dichas bandas, con el fin de realzar el producto visualmente.
- Composición Color RGB (654) a 15 m, tras fusión con la banda pancromática, y previo cálculo y reescalado de los valores de las reflectividades de dichas bandas, con el fin de realzar el producto visualmente.
- Composición Color RGB (654) a 15 m, y posteriormente erosionada en un marco 2 píxeles de grosor, aplicando la Máscara No-Data o AOI.
- Máscara No-Data o AOI (Área of Interest).
- Máscara de Nubes y Sombras, a partir de la banda de calidad “bqa”.
- NDVI previo a la normalización, tras el cálculo de reflectividades de las bandas 5 y 4.

En la **segunda fase** (Figura 27), el tratamiento necesita un fichero de configuración de la normalización que previamente se ha tenido que generar, bajo la supervisión de un técnico. Los productos generados en esta segunda fase son:

- NDVI normalizado.
- NDVI erosionado en un marco de 2 píxeles aplicando la Máscara No-Data o AOI.
- NDVI reescalado entre 0 y 200
- NDVI tras la aplicación de la máscara de nubes y sombras, al NDVI reescalado entre 0 y 200.
- NDVI tras la aplicación de la máscara de nubes y sombras, al NDVI reescalado entre 0 y 200, y erosionado en un marco de 2 píxeles de grosor aplicando la Máscara No-Data o AOI.

Para la ejecución de cada una de estas fases se han creado dos programas de automatización respectivamente y que dependen de un fichero de configuración ("**config.txt**"): Fase 1: "**procesar.py**" y Fase 2: "**normalizar.py**"

Para facilitar aún más la labor del técnico, minimizando su intervención, reduciendo así la posibilidad de errores "humanos" no sistemáticos, se ha creado un tercer programa ("**definir.py**") para la generación de los ficheros de normalización necesarios en la segunda fase.

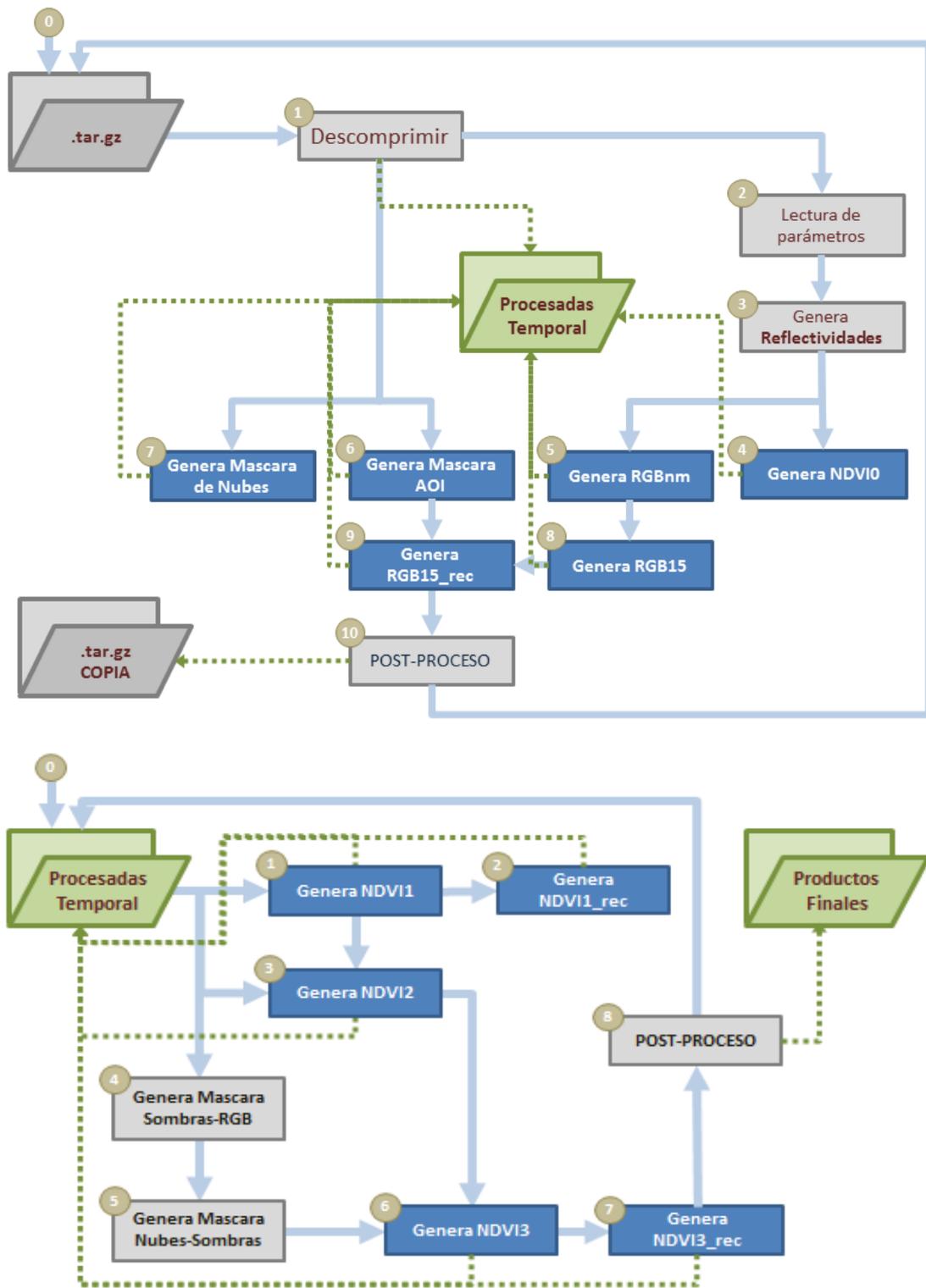


Figura 27. Diagrama de flujo del procesado durante la fase 1 (arriba) y 2 (abajo).

## 2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS EN EL PROCESO DE CLASIFICACIÓN DE USOS DEL SUELO EN REGADÍO MEDIANTE RECURSOS DE TELEDETECCIÓN Y APOYO CARTOGRÁFICO.

En el presente anejo se especifican las características técnicas empleadas en el proceso de clasificación de usos del suelo mediante recursos de Teledetección y apoyo cartográfico. El objetivo principal es obtener la clasificación de usos de suelo en regadío sobre los perímetros de zonas regables, para poder monitorizar los cultivos en regadío.

### 2.1. ESQUEMA GENERAL DEL PROCEDIMIENTO DE CLASIFICACIÓN.

El procedimiento se basa en la combinación de la clasificación basada en secuencias multitemporales de imágenes de satélite tipo Landsat, junto con el análisis e integración de múltiples fuentes cartográficas mediante herramientas SIG (Figura 28). Esto nos llevará a obtener un mapa de cultivos regados agrupados en clases para cada uno de los años del estudio.

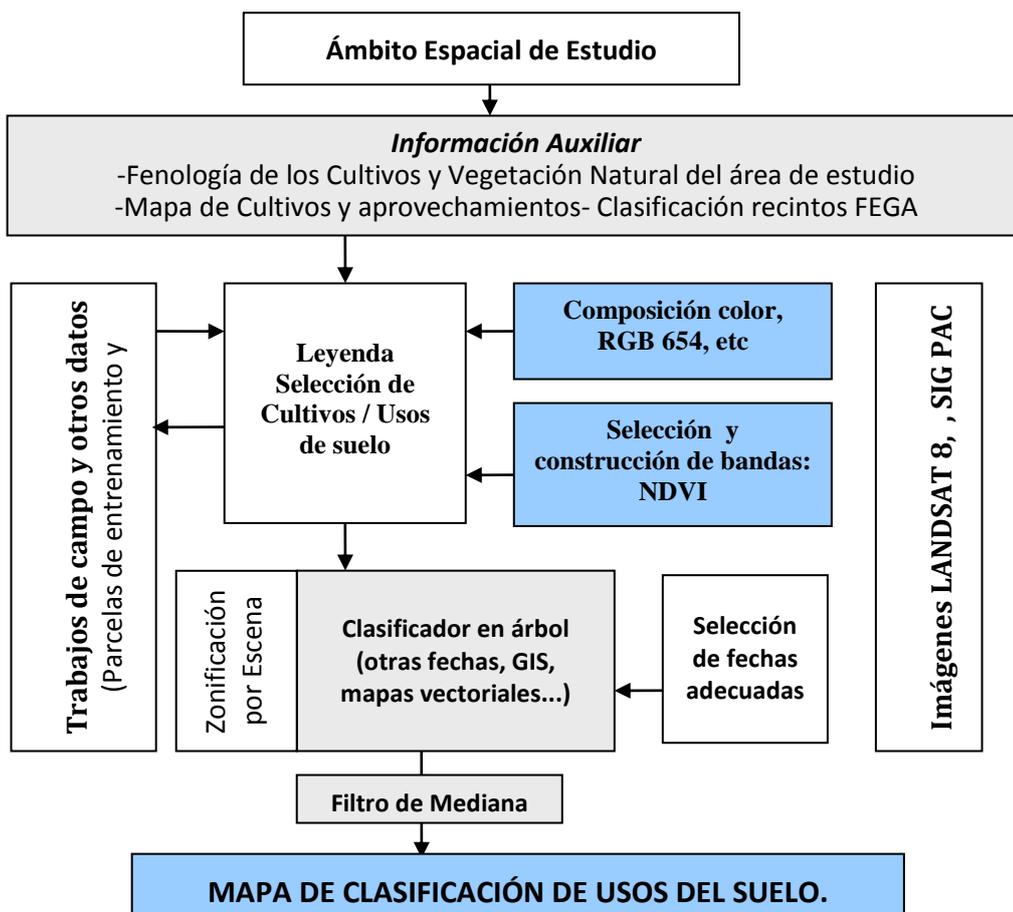


Figura 28. Diagrama de flujo del proceso de clasificación.

## 2.2. MATERIAL EMPLEADO EN LA CLASIFICACIÓN.

Imágenes a utilizar:

- Secuencias temporales de imágenes NDVI Landsat 8 correspondientes a cada uno de los años del proyecto, y a cada una de las escenas que abarcan la zona de estudio (ver Figura 1). El número de imágenes potencialmente “utilizables” que componen cada secuencia depende de la nubosidad, que cambia según la parte de la zona de estudio que se considere. Resaltar que en las zonas de solape entre imágenes dispondremos de mayor número de imágenes por año.

Fuentes cartográficas a analizar e integrar:

- Cartografía, tanto gráfica como de la base datos alfanumérica de los recintos SIGPAC, proporcionada por el (FEGA) del Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino, en adelante MAGRAMA.
- Perímetros de zonas regables: Zonas regables proporcionadas por el MAGRAMA según Plan Hidrológico Nacional H2020 (PHN2020) y de las Unidades de Demanda Agraria (UDA) según las confederaciones hidrográficas, y en aquellos casos en los que se hayan podido conseguir.

## 2.3. DIFERENCIACIÓN DEL MATERIAL EMPLEADO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS DIFERENTES CLASES.

Se detalla en la siguiente tabla, los usos del suelo discriminados mediante la clasificación desarrollada y que son idénticos para cada año de estudio. Esta leyenda coincide con la mostrada en el sistema WebSIG SPIDER.

**Tabla 15.** Usos del suelo clasificados así como su leyenda y descripción.

Grupo	Uso del Suelo	Leyenda	Descripción del uso
<b>Cultivos herbáceos en regadío</b>	Regadíos de Primavera		Desarrollo fenológico centrado en la primavera.
	Regadíos de Verano		Desarrollo fenológico centrado en el verano.
	Regadíos de Primavera - Verano		Desarrollo fenológico en primavera y verano
	Regadíos de Otoño - Invierno		Desarrollo fenológico en otoño e invierno
<b>Cultivos leñosos en regadío</b>	Viñedo		Agricultura de diferentes especies vitivinícolas.
	Olivar		Agricultura de diferentes especies oleícolas.
	Cítricos		Agricultura de diferentes especies de árboles cítricos.
	Frutales		Agricultura de diferentes especies de árboles frutales.
<b>Invernaderos</b>	Invernaderos		Agricultura bajo invernaderos.

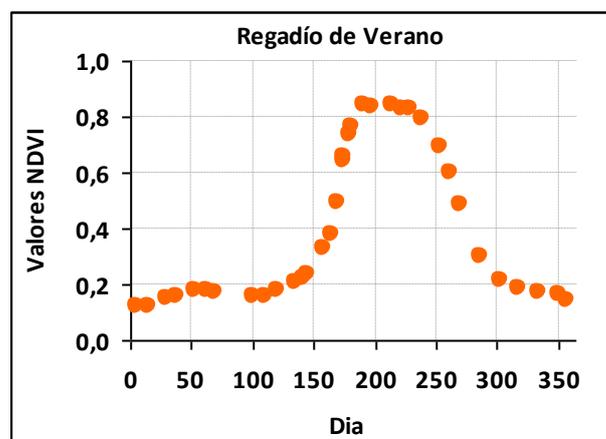
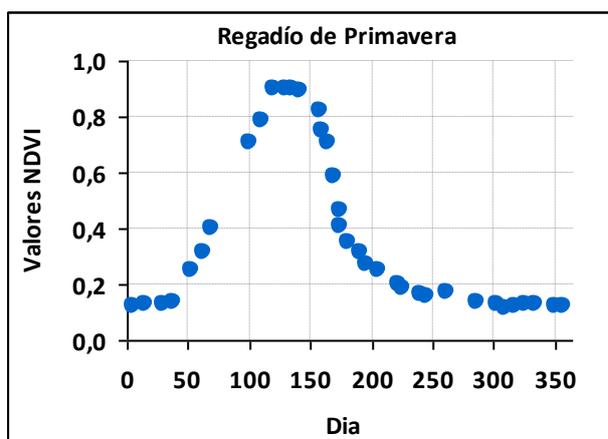
Atendiendo a la discriminación de clases presentada en la siguiente tabla, se muestra a continuación la metodología empleada para la obtención de las diferentes clases obtenidas en el mapa de usos del suelo.

**Tabla 16.** Metodología empleada para la obtención de las diferentes clases.

USOS DEL SUELO	METODOLOGÍA
Regadío de primavera	– Clasificación supervisada por árboles de decisión basada en series multitemporales de NDVI  – Empleo de cartografía disponible: Regadíos2013, SigPAC y UDAs
Regadío de verano	
Regadío de primavera/verano	
Regadío de otoño/invierno	
Viñedo en regadío	– Clasificación supervisada por árboles de decisión basada en series multitemporales de NDVI , atributos de los recintos contenidos en la cartografía disponible y fotointerpretación
Olivar en regadío	
Cítricos en regadío	
Frutales en regadío	– Empleo de cartografía disponible: Regadíos2013 , SigPAC y UDAs
Invernadero	

#### 2.4. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE EVOLUCIÓN DE NDVI PARA DIFERENTES USOS DEL SUELO.

Puesto que una parte importante del proceso de clasificación se realiza atendiendo a las curvas multitemporales de evolución de NDVI se muestran las curvas típicas para cada uso de suelo clasificado (obtenidas a través del sistema WebSIG SPIDER-Center) (Figura 29).



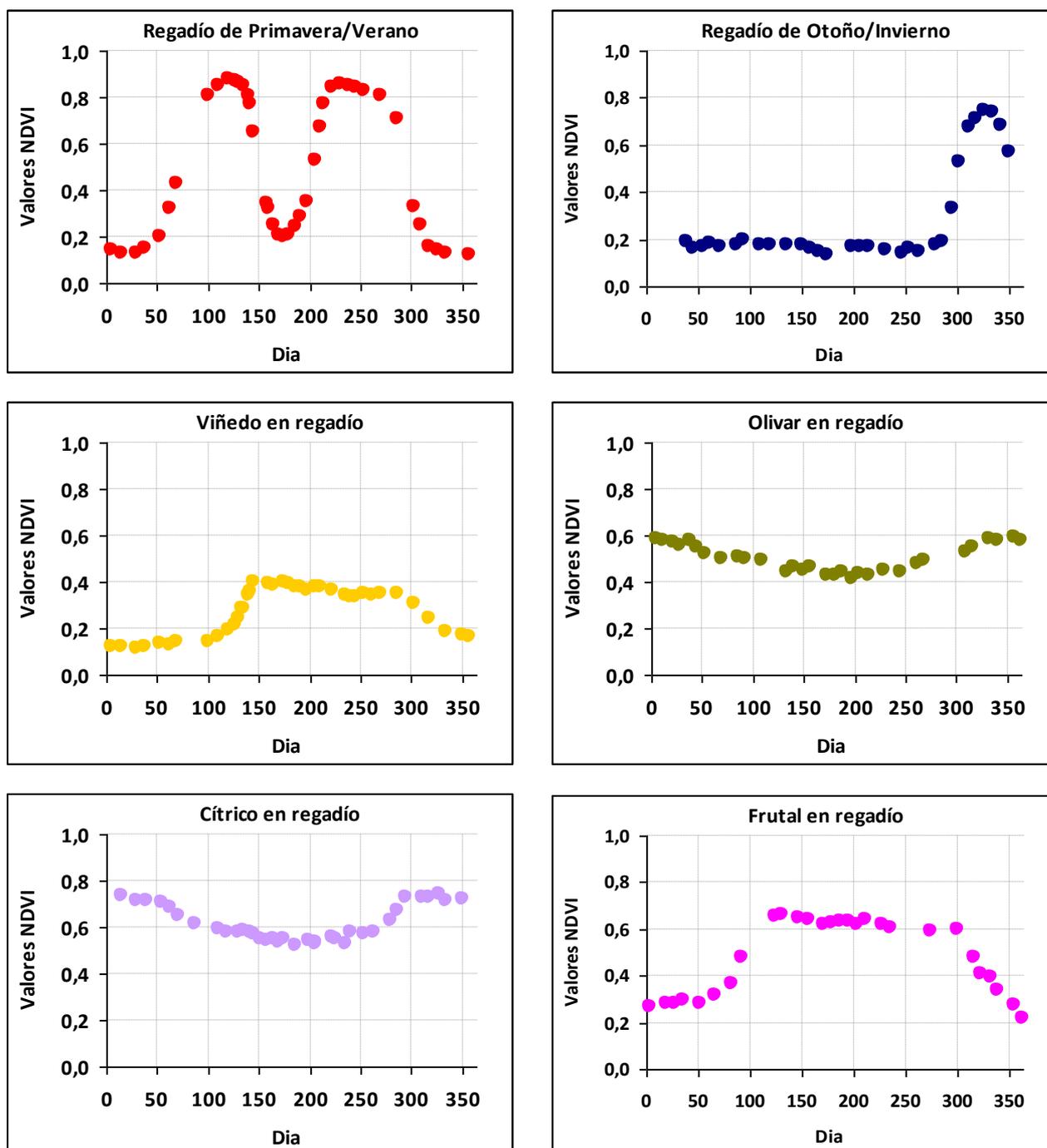


Figura 29. Curvas características de los diferentes usos de suelo en regadío clasificados.

## 2.5. PROCEDIMIENTO DE CLASIFICACIÓN SUPERVISADA POR ÁRBOLES DE DECISIÓN.

El conocimiento de la evolución temporal de las diferentes cubiertas vegetales ha sido el instrumento esencial en la identificación de los cultivos de regadío. Las diferentes fases de desarrollo se expresan habitualmente a través de las curvas de los coeficientes de cultivo ( $K_c$ ),

que a su vez están estrechamente relacionados con la fracción de cobertura vegetal verde, y cuyos valores máximos coinciden con los momentos en que el cultivo cubre en mayor medida el suelo.

La magnitud que se deriva de las imágenes multispectrales de satélite y que está directamente relacionada con la fracción de cobertura vegetal verde (fc) es el denominado Índice de Vegetación por Diferencias Normalizado (NDVI). Así, al utilizar una secuencia temporal de imágenes multispectrales, la evolución temporal del NDVI derivado de ellas permite describir la evolución temporal de la cubierta vegetal. Por lo tanto, se puede hacer el seguimiento mediante el NDVI de las diferentes fases de desarrollo en el crecimiento del cultivo. Resaltar que, aquellos cultivos que presenten una similar evolución fenológica y de cobertura del suelo presentarán una similar evolución su NDVI. En consecuencia, aplicando estos conceptos, la discriminación se hace entre grupos de cultivos que presentan una evolución temporal diferente. Esto presenta una importante ventaja: aquellos cultivos con semejante evolución temporal en desarrollo y cobertura vegetal, tienen semejantes necesidades hídricas.



Figura 30. Esquema general del proceso de clasificación.

Para la realización de las clasificaciones utilizaremos los procesos de clasificación basados en clasificadores secuenciales en árbol (árboles de decisión).

El primer paso requiere una recopilación de toda la información disponible de tipo vectorial (SigPAC, PHN H2020 y UDAs), así como de la secuencia temporal de imágenes NDVI disponibles de nuestra zona de clasificación y para cada año de estudio.

Seguidamente, el procedimiento consiste en separar los píxeles de la escena a clasificar según unas reglas de clasificación basadas en las secuencias temporales antes mostradas. En consecuencia, se busca discriminar por fechas y valores NDVI los diferentes usos en regadío. Además, la información alfanumérica contenida en la información vectorial es así mismo empleada para determinar las zonas regables. Por ello, mediante las decisiones que se van realizando sucesivamente, se construye un árbol de decisión, en el que la propia estructura piramidal establece una jerarquía en las decisiones (Figura 31). Por ello, es sencillo el análisis de este tipo de criterios, su comprobación con los datos de referencia.

El conocimiento de la zona, tanto de los datos de la imagen, como de la información auxiliar, se ha de trasladar al ordenador en forma de reglas. La forma más sencilla en que este proceso se hace es en forma de operadores lógicos condicionales, que constituyen las reglas, en las que la estructura es: SI (Condición) ENTONCES (Inferencia).

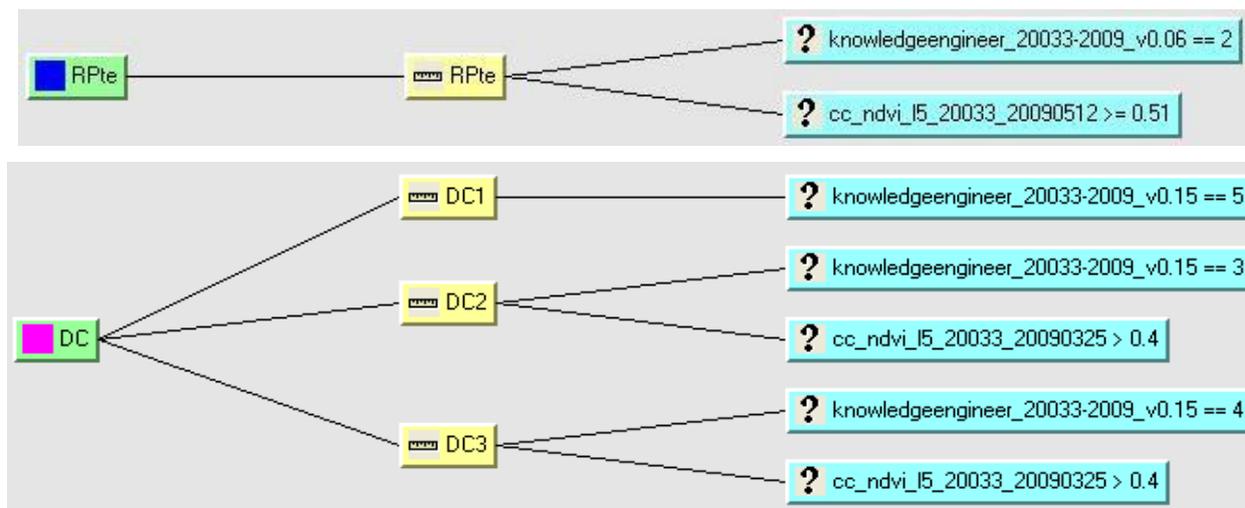


Figura 31. Ejemplo esquemático de la construcción de clasificación en árbol.

## 2.6. INCORPORACIÓN DE LA INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA DISPONIBLE.

A continuación se detalla la metodología seguida en la extracción de los polígonos posteriormente incorporados a la clasificación. Se trata de información cartográfica, SigPAC, Unidades de Demanda Agraria y zonas regables del PHN H2020.

A partir de la información alfanumérica se extrae los códigos que se muestran en la tabla, a continuación.

**Tabla 17.** Usos SIGPAC para la clasificación.

Usos de suelo clasificados	Código SIGPAC
<b>Regadío de primavera</b> <b>Regadío de verano</b> <b>Regadío de primavera-verano</b> <b>Regadío de otoño-invierno</b>	TA: Tierra Arable, TH: Huerta (regadío) y PA: Pasto arbolado (regadío), PR: Pasto arbustivo (regadío) y PS: Pastizal (regadío)
<b>Viñedo</b>	CV: Asociación cítricos-viñedo, FV Frutos secos y viñedo, VF: viñedo frutal, VI: viñedo, VO: Viñedo-Oliver COEF_REGAD > 0
<b>Oliver</b>	FL: Frutos secos y viñedo, OC: Asociación oliver-cítricos, OF: Oliver-frutal, OV: Oliver COEF_REGAD > 0
<b>Cítricos</b>	CF: Asociación cítricos-frutales, CI: Cítricos, CS: Asociación cítricos- frutales de cascara COEF_REGAD > 0
<b>Frutal</b>	FF: Asociación frutales- frutales de cascara, FS: Frutos secos, FY: Frutales COEF_REGAD > 0
<b>Invernaderos y cultivos bajo plástico</b>	IV: Invernaderos

Los polígonos extraídos de la cartografía vectorial SigPAC son los recintos correspondientes a todas las provincias de la España Peninsular, los cuales contienen los campos identificadores de: provincia, municipio, agregado, polígono, zona, parcela, recinto, coeficiente de regadío ("COEF\_REGAD") y uso2003 ("USO\_SIGPAC"). Los recintos extraídos de la cartografía SigPAC, son polígonos que se encuentren en regadío.

Como capa base de la clasificación, se utilizan las capas resultantes del cruce entre la capa de recintos de leñosos de secano del SigPAC con la las capas de zonas regables del PHN H2020, y con las capas de unidades de demanda agraria.

## 2.7. RESULTADOS DE CLASIFICACIÓN DE USOS DE SUELO EN REGADÍO

Los resultados que se obtendrán tras el proceso de clasificación asistida por Teledetección y recursos cartográficos se representarán en dos formatos:

- Dos imágenes de la zona de estudio, año 2014 y año 2015, presentados en SPIDERwebGIS®.
- Agregación de los resultados de superficie en riego por demarcación hidrográfica

**Tabla 18.** Código de los usos del suelo en regadío clasificados.

Usos de suelo en regadío	Código	Usos de suelo en regadío	Código
Regadío de primavera	RP	Viñedo en regadío	VR
Regadío de verano	RV	Olivar en regadío	OR
Regadío de primavera y verano	RPV	Frutales cítricos en regadío	FC
Regadío de otoño e invierno	ROI	Frutales en regadío	FR
Invernadero	INV		



**Tabla 19.** Superficie regada (ha) por usos y Demarcaciones hidrográficas en 2014.

Demarcación Hidrográfica	RP	RV	RPV	ROI	VR	OR	FC	FR	INV	TOTAL
<b>Cantábrico Occidental</b>	4	8	46	0	0	0	0	22	130	<b>210</b>
<b>Cantábrico Oriental</b>	0	2	1	0	0	0	0	11	85	<b>99</b>
<b>Cuencas internas de Cataluña</b>	10.146	19.314	14.987	208	11.829	8.443	884	22.889	696	<b>89.396</b>
<b>Cuencas mediterráneas de Andalucía</b>	7.674	3.557	6.265	2.958	312	24.701	20.834	14.806	38.801	<b>119.908</b>
<b>Duero</b>	143.026	230.794	107.096	14.342	15.423	795	0	1.880	161	<b>513.517</b>
<b>Ebro</b>	141.793	164.511	254.094	3.677	49.876	42.918	7.215	117.045	551	<b>781.680</b>
<b>Galicia costa</b>	6	105	729	2	4	0	0	0	78	<b>924</b>
<b>Guadalete y Barbate</b>	17.952	25.729	11.070	1.205	505	8.055	817	711	726	<b>66.770</b>
<b>Guadalquivir</b>	99.431	140.921	39.752	5.206	2.829	373.103	46.680	18.208	5.625	<b>731.755</b>
<b>Guadiana</b>	102.474	99.841	58.931	12.361	184.608	40.665	4.291	21.062	425	<b>524.658</b>
<b>Júcar</b>	48.598	39.831	32.847	4.148	36.810	15.027	162.469	25.511	1.563	<b>366.804</b>
<b>Miño-sil</b>	1.391	1.955	7.024	33	3.953	0	0	1.015	13	<b>15.384</b>
<b>Segura</b>	24.939	4.620	46.539	8.406	21.976	12.133	50.955	47.294	14.098	<b>230.960</b>
<b>Tajo</b>	34.180	46.715	89.274	4.782	10.433	23.587	4	12.629	194	<b>221.798</b>
<b>Tinto, Odiel y Piedras</b>	6.415	549	1.318	185	54	3.044	12.528	2.658	4.743	<b>31.494</b>
<b>TOTAL</b>	<b>638.029</b>	<b>778.452</b>	<b>669.973</b>	<b>57.513</b>	<b>338.612</b>	<b>552.471</b>	<b>306.677</b>	<b>285.741</b>	<b>67.889</b>	<b>3.695.357</b>

**Tabla 20.** Superficie regada (ha) por usos y Demarcaciones hidrográficas en 2015.

Demarcación Hidrográfica	RP	RV	RPV	ROI	VR	OR	FC	FR	INV	TOTAL
<b>Cantábrico Occidental</b>	9	3.354	224	0	0	0	0	22	130	<b>3.739</b>
<b>Cantábrico Oriental</b>	0	540	21	0	0	0	0	11	85	<b>657</b>
<b>Cuencas internas de Cataluña</b>	7.002	15.485	20.092	71	11.829	8.443	884	22.889	696	<b>87.392</b>
<b>Cuencas mediterráneas de Andalucía</b>	9.650	3.749	6.497	1.988	312	24.701	20.834	14.806	38.801	<b>121.338</b>
<b>Duero</b>	236.347	202.514	101.069	2.020	15.423	795	0	1.880	161	<b>560.208</b>
<b>Ebro</b>	148.243	134.115	280.624	1.290	49.876	42.918	7.215	117.045	551	<b>781.876</b>
<b>Galicia costa</b>	6	205	505	0	4	0	0	0	78	<b>799</b>
<b>Guadalete y Barbate</b>	19.153	24.209	8.190	1.281	505	8.055	817	711	726	<b>63.648</b>
<b>Guadalquivir</b>	113.348	129.291	20.682	2.060	2.829	373.103	46.680	18.208	5.625	<b>711.825</b>
<b>Guadiana</b>	104.738	92.893	40.071	1.759	184.608	40.665	4.291	21.062	425	<b>490.512</b>
<b>Júcar</b>	52.041	45.449	25.878	4.138	36.810	15.027	162.469	25.511	1.563	<b>368.886</b>
<b>Miño-sil</b>	1.021	3.278	9.274	0	3.953	0	0	1.015	13	<b>18.554</b>
<b>Segura</b>	23.096	11.000	39.830	10.983	21.976	12.133	50.955	47.294	14.098	<b>231.364</b>
<b>Tajo</b>	57.296	50.056	48.295	1.143	10.433	23.587	4	12.629	194	<b>203.637</b>
<b>Tinto, Odiel y Piedras</b>	7.449	380	518	10	54	3.044	12.528	2.658	4.743	<b>31.384</b>
<b>TOTAL</b>	<b>779.398</b>	<b>716.517</b>	<b>601.769</b>	<b>26.744</b>	<b>338.612</b>	<b>552.470</b>	<b>306.677</b>	<b>285.741</b>	<b>67.890</b>	<b>3.675.819</b>

## 2.8. EXPLOTACIÓN SECUENCIAS TEMPORALES Kcb

En este apartado se presenta a modo de ejemplo el Kcb promedio por uso de suelo en regadío para determinadas comunidades de regantes, cuya delimitación ha sido obtenida de la capa vectorial provisional del Plan Nacional de Regadíos Horizonte 2020. La metodología seguida permite explotar la información contenida en la secuencia temporal de Kcb libre de nubes y sombras, con el fin de mostrar las ventajas que presenta la monitorización en parcela mediante imágenes de satélite. Esta metodología consiste en obtener los estadísticos de la media y la desviación estándar de dicha secuencia que sobre todos los píxeles de un uso de regadío concreto en una comunidad de regantes concreta tiene lugar en cada fecha de captura de la imagen. A continuación se muestran los ejemplos obtenidos sobre diferentes comunidades de regantes.

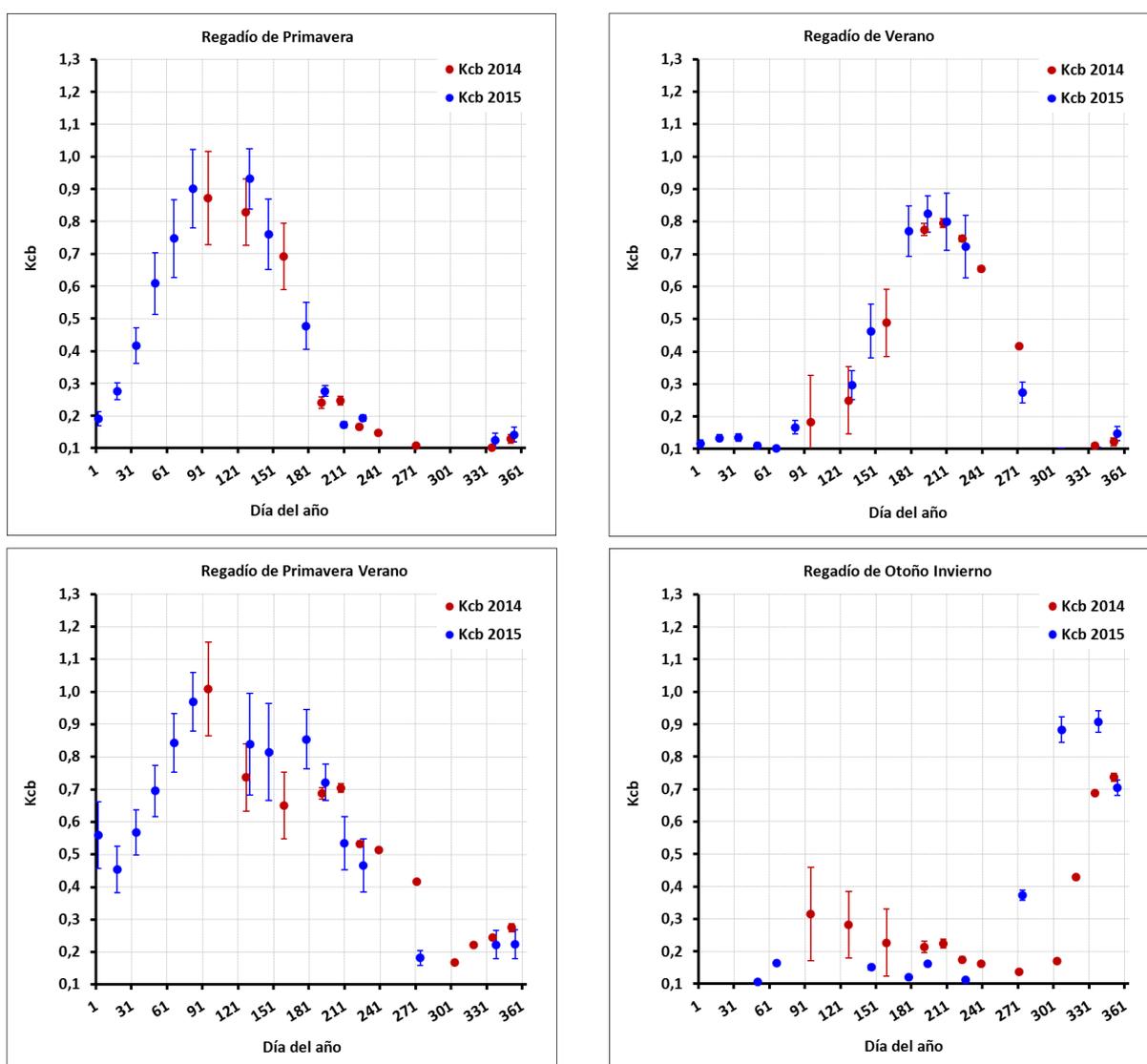


Figura 32. Kcb promedio (2014-2015) en la CR sector B-XII del bajo Guadalquivir, demarcación hidrográfica del Guadalquivir

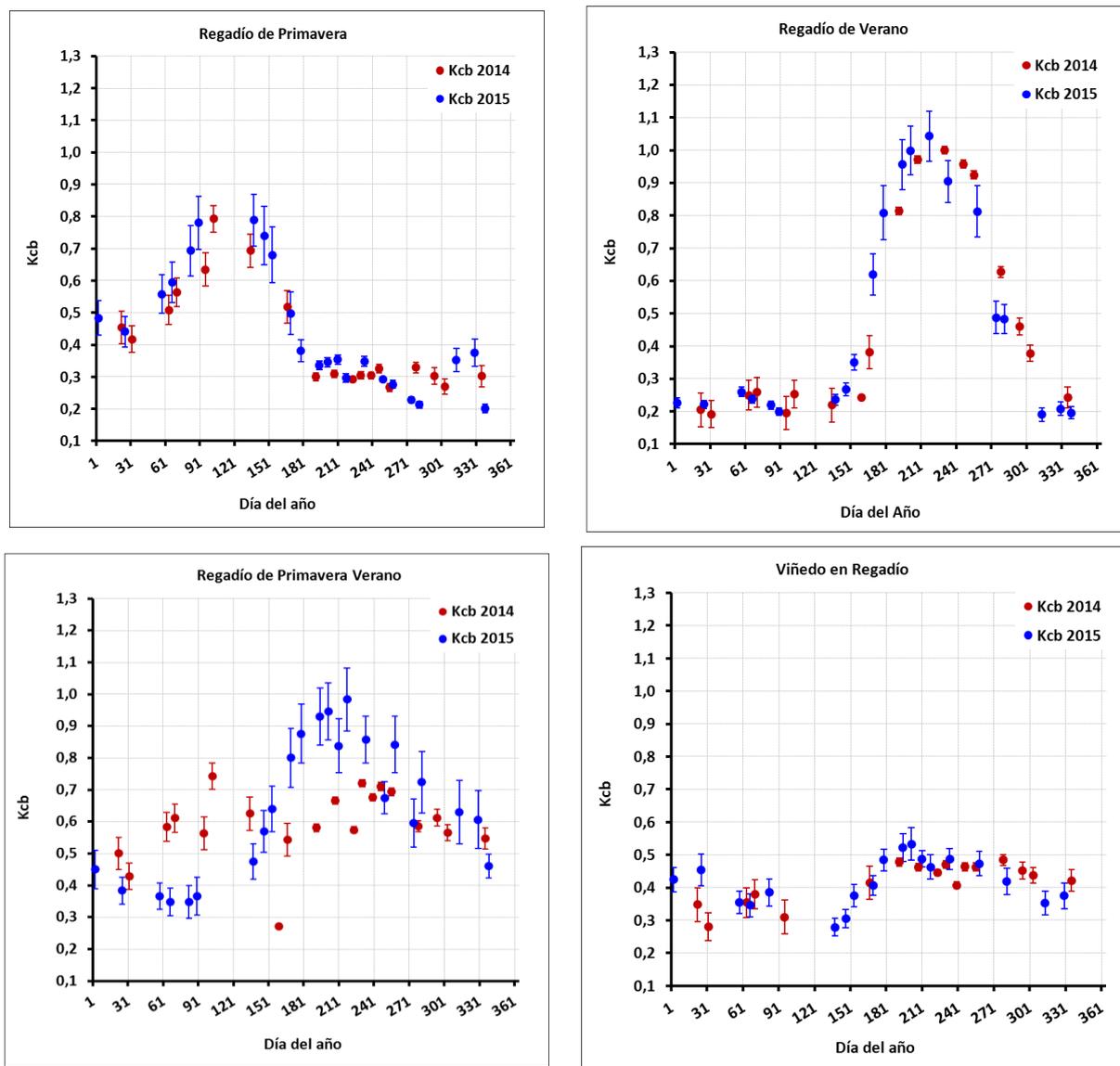


Figura 33. Kcb promedio (2014-2015) en la Comunidad General Paramo bajo de León y Zamora, demarcación hidrográfica del Duero

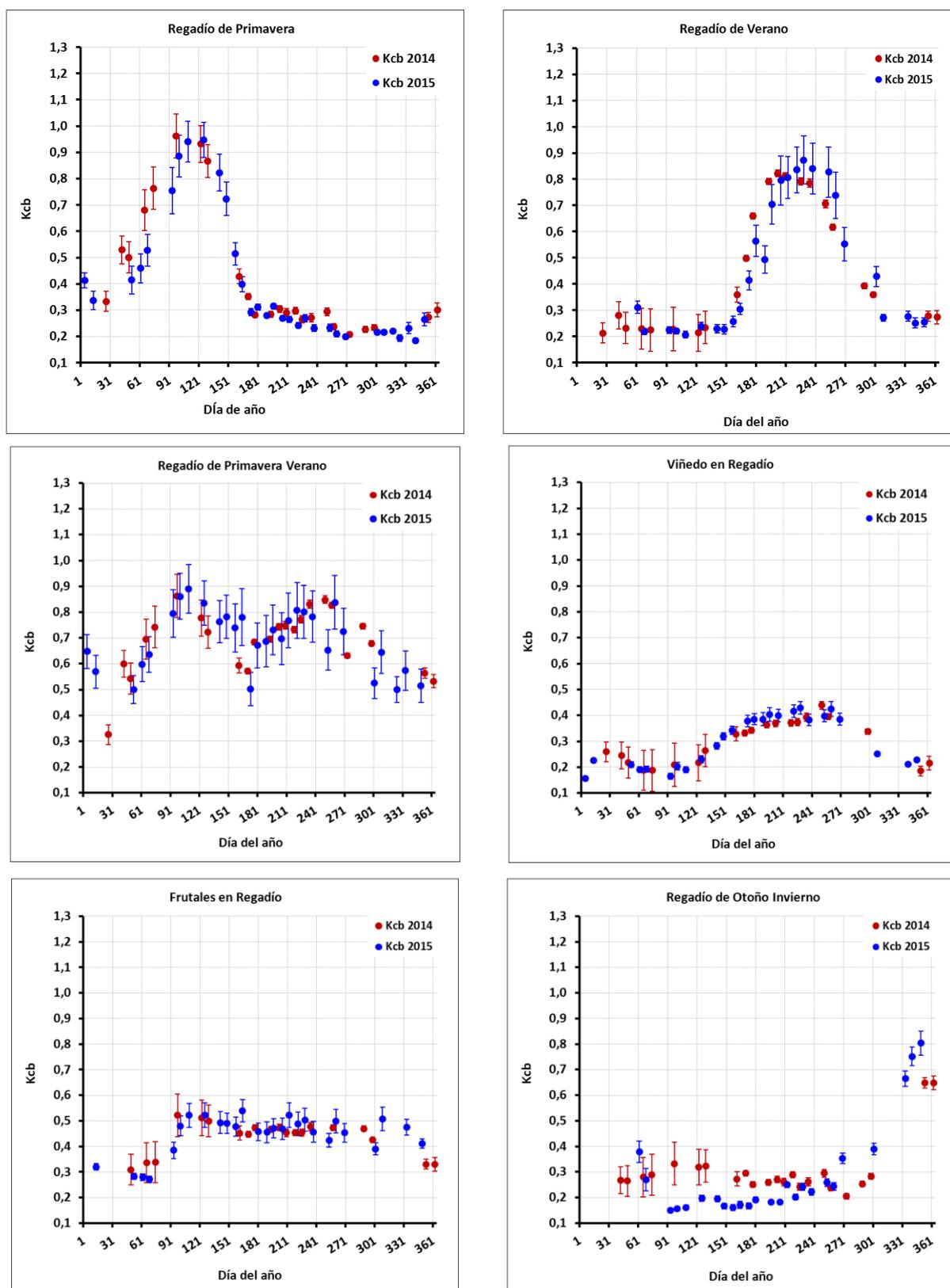


Figura 34. Kcb promedio (2014-2015) en la CR Nº XI de los riegos de Bardenas, acequia de Sora, demarcación hidrográfica del Ebro

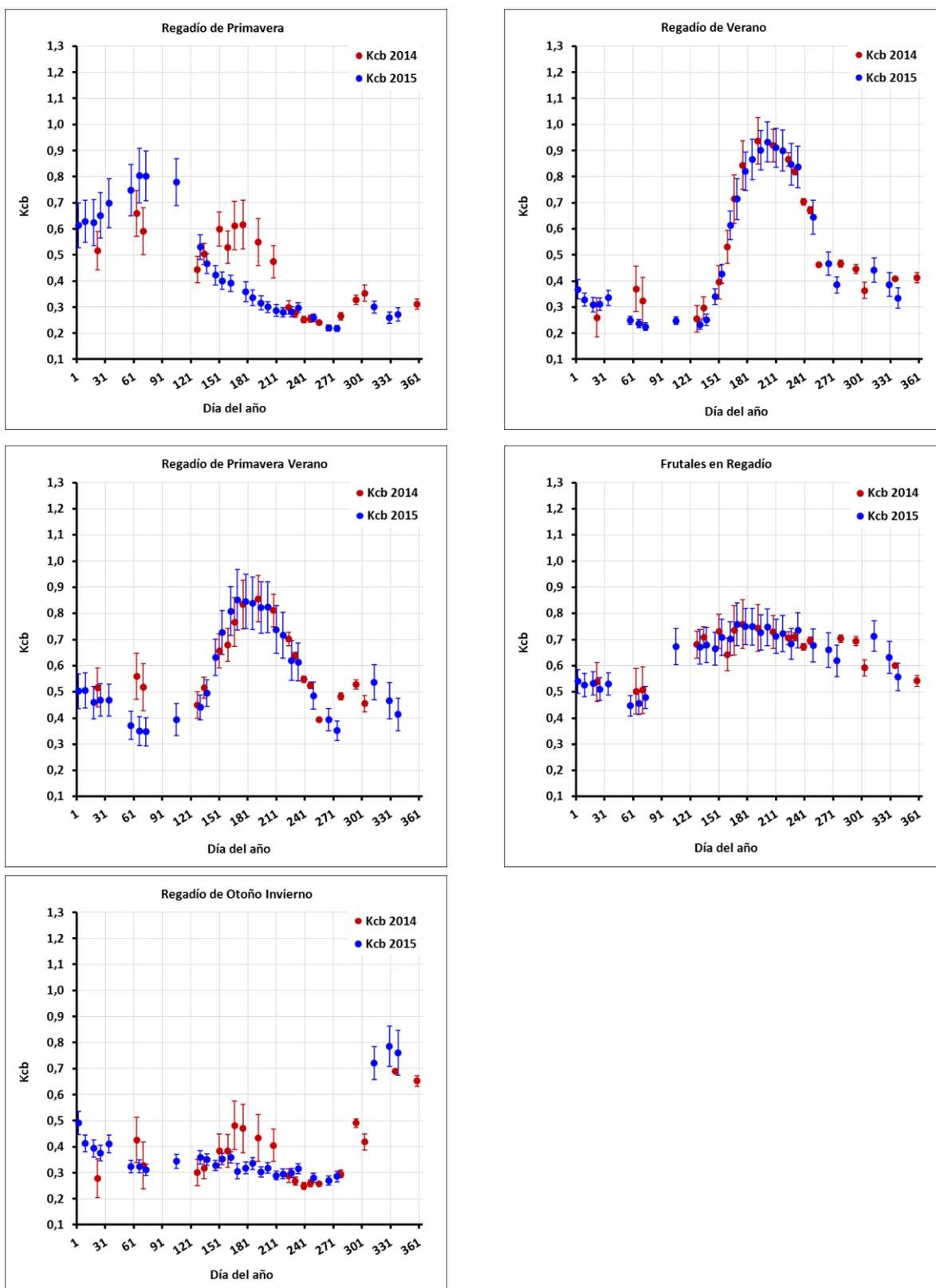


Figura 35. Kcb promedio (2014-2015) en la CR Badajoz - canal de Montijo, demarcación hidrográfica del Guadiana

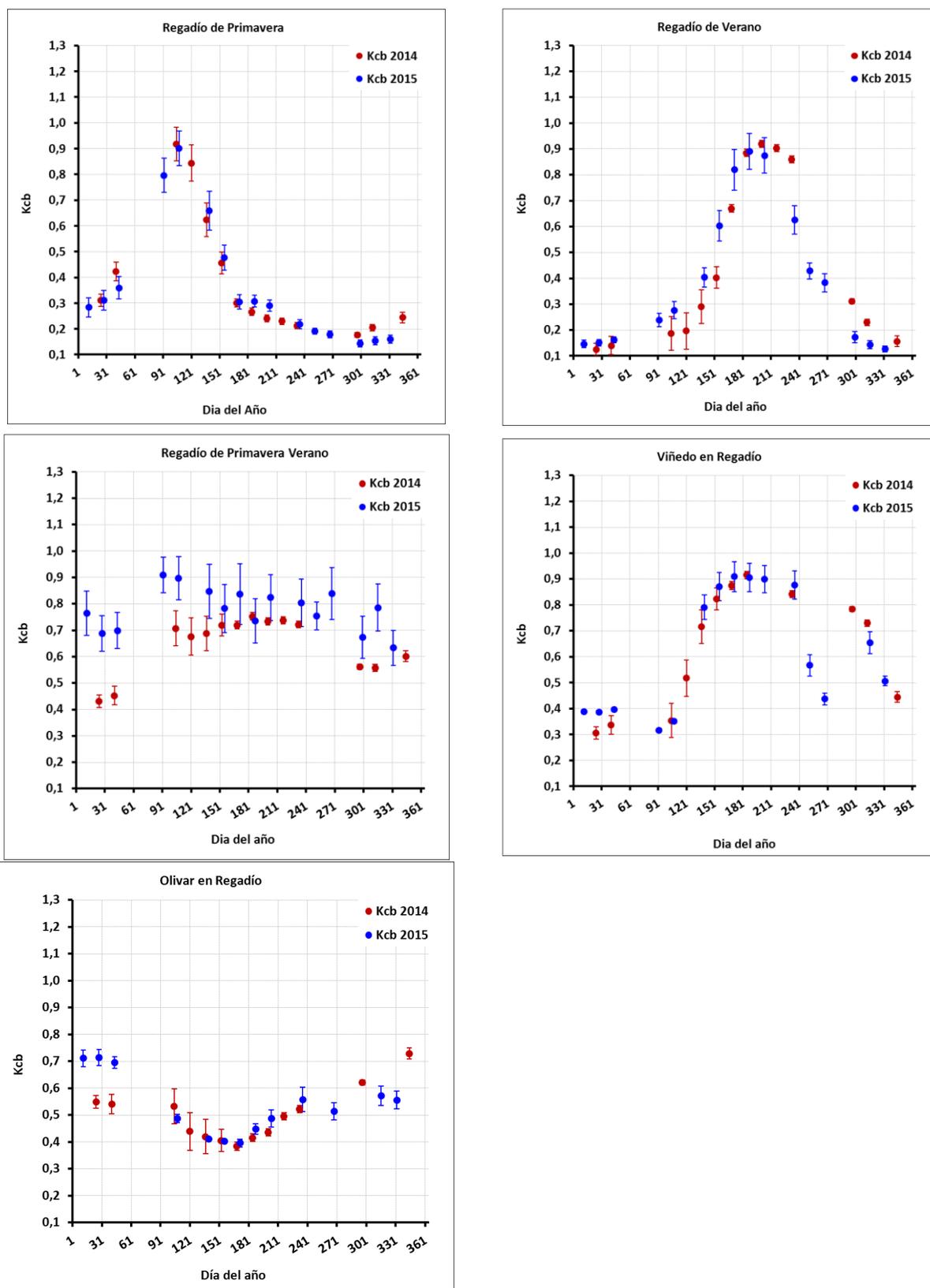


Figura 36. Kcb promedio (2014-2015) en la CR Real acequia del Jarama, demarcación hidrográfica del Tajo

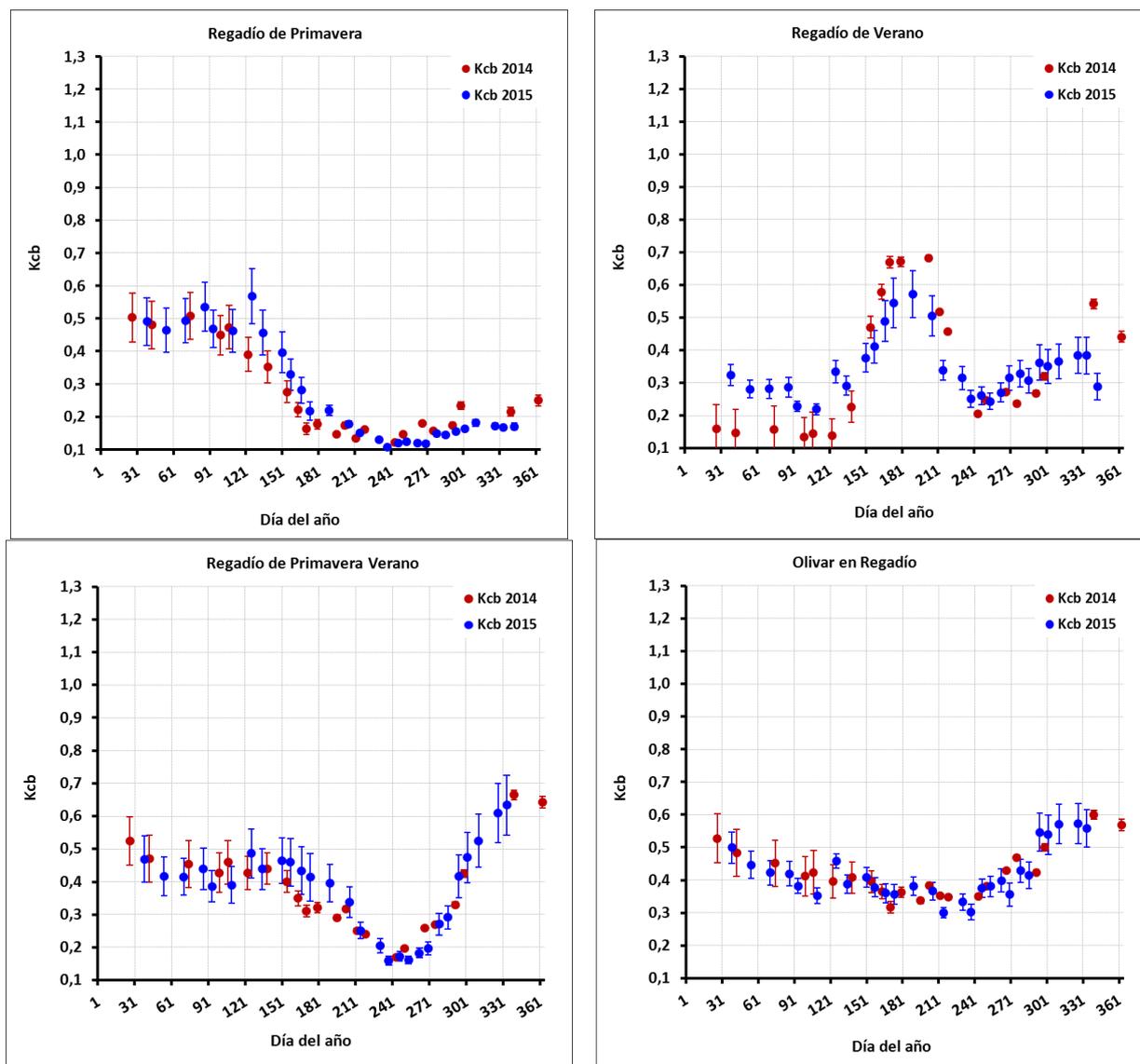


Figura 37. Kcb promedio (2014-2015) en la CR campo de Cartagena, demarcación hidrográfica del Segura

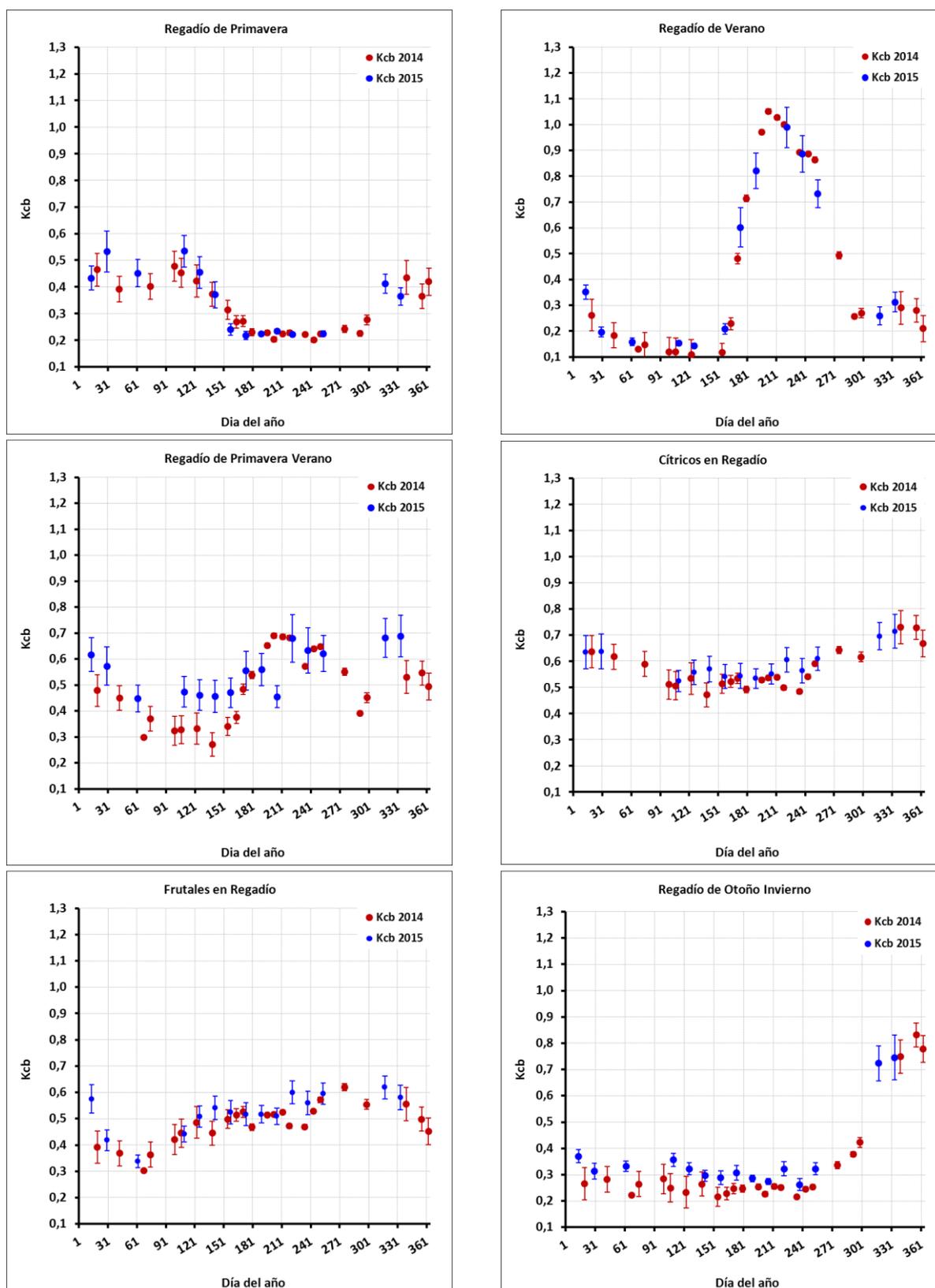


Figura 38. Kcb promedio (2014-2015) en la CR de la acequia Real del Júcar, demarcación hidrográfica del Júcar

### 3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y METODOLÓGICAS EN EL PROCESO DE SIMULACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS DIARIAS MEDIANTE HIDROMORE.

En el presente anejo se especifican las características técnicas empleadas en el proceso de simulación de las necesidades hídricas mediante HidroMORE, así como la metodología implícita en la simulación, esto es, el modelo FAO-56 de Coeficiente Dual asistido por satélite.

#### 3.1. ASPECTOS METODOLÓGICOS DEL MODELO EMPLEADO POR HIDROMORE.

##### 3.1.1. El modelo FAO56 de Coeficiente Dual.

El modelo FAO-56 de Coeficiente Dual trata sobre el cálculo de la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) tanto bajo condiciones estándar, es decir cuando no existen limitaciones al crecimiento del cultivo o la evapotranspiración (Allen et al., 1998), o bajo condiciones de estrés. Este modelo estima la  $ET_c$  a través del producto de la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) y el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) (Allen et al., 1998b; Doorenbos and Pruitt, 1977), separando este último como la suma del coeficiente de cultivo basal ( $K_{cb}$ ), relacionado con la transpiración de la planta, y el coeficiente de evaporación ( $K_e$ ), relacionado con la evaporación del suelo (Wright, 1982; Allen et al., 1998). Además, el  $K_c$  incorpora el coeficiente de estrés hídrico ( $K_s$ ) para simular bajo condiciones diferentes a las óptimas. En resumen, la ecuación empleada es:

$$ET_c = K_c \cdot K_s \cdot ET_o = (K_s K_{cb} + K_e) \cdot ET_o \quad \text{Eq. 5}$$

##### 3.1.2. Asimilación del coeficiente de cultivo basado en reflectividad.

La obtención del  $K_{cb}$  basado en la reflectividad espectral de la cubierta, es posible y ha sido ensayado y demostrado en numerosas ocasiones (Campos et al., 2010d; González-Piqueras, 2006). Por tanto, la obtención de coeficientes de cultivo, en nuestro caso  $K_{cb}$ , derivados de las imágenes de satélite, nos permite acceder al modelo FAO-56 de Coeficiente Dual y estimar por último las necesidades hídricas de los cultivos en suelo, sin tener que recurrir a los valores tabulados propuestos en la metodología clásica.

Tras el procesado de las imágenes y consecución de los productos de IV, fundamentales para estimar los  $K_{cb}$ , seremos capaces de representar las evoluciones temporales monitorizando así la relación entre la evapotranspiración del cultivo y la evapotranspiración de referencia ( $ET_c/ET_o$ ). De esta forma, se obtendrán mapas de coeficiente de cultivo basal de imágenes satelitales.

##### 3.1.3. Cultivos en condiciones no estándar. Balance de agua en la capa de suelo.

Hemos visto por tanto que obtener la  $ET_c$  bajo condiciones estándar (sin limitaciones al crecimiento o la evapotranspiración), es posible a través de las técnicas de Teledetección.

Ahora bien, presentar una herramienta a los gestores del agua que no contemple la realidad que se da en el campo, no sería adecuado en el contexto de este estudio. En la práctica, los cultivos raramente se encontrarán en condiciones estándar, pues limitaciones por escasez de agua en la zona radicular serán comunes. Es por ello que se hace necesario un balance preciso de agua en el suelo.

Las fuerzas que actúan sobre el agua presente en el suelo disminuyen su energía potencial y la hacen menos disponible para su extracción por parte de las raíces de las plantas. Cuando la energía potencial del agua en el suelo cae por debajo de cierto valor umbral, se dice que el cultivo está estresado. Los efectos del estrés hídrico son incorporados al multiplicar en el modelo de Coeficiente Dual, el  $K_{cb}$  por el coeficiente de estrés hídrico ( $K_s$ ) (Allen et al., 1998), de la siguiente forma:

$$ET_{caj} = (K_s \cdot K_{cb} + K_e) \cdot ET_o \quad \text{Eq. 6}$$

Determinar por tanto  $K_s$  resulta indispensable si se quieren generar productos válidos. Para su mejor comprensión se adjunta la siguiente figura:

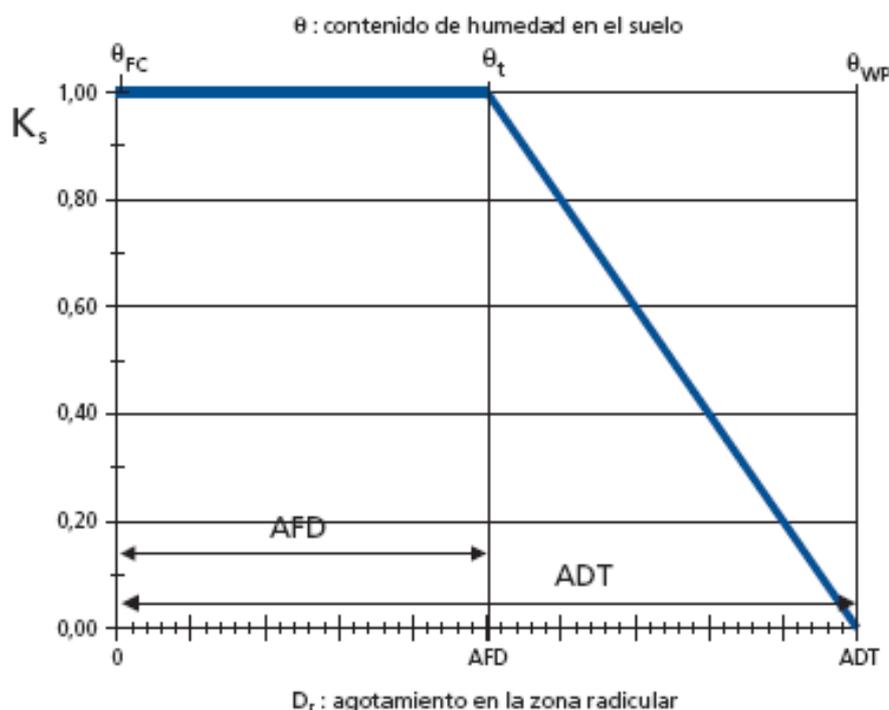


Figura 39. Coeficiente de estrés hídrico,  $K_s$  (Allen et al., 1998).

Teniendo en cuenta la anterior figura, FAO 56 propone la siguiente ecuación para determinar  $K_s$ :

$$K_s = \frac{ADT - D_r}{ADT - AFA} = \frac{ADT - D_r}{(1 - p) \cdot ADT} \quad \text{Eq. 7}$$

Donde:

$K_s$  es un factor adimensional de reducción de la transpiración que depende de la cantidad de agua disponible en el suelo [0 - 1],

$D_r$ , es el agotamiento de humedad en la zona radicular [mm],

ADT, es el agua disponible total en la zona radicular del suelo [mm],

AFA, es el agua fácilmente asimilable por las raíces de las plantas [mm],

$p$ , es la fracción de la ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin sufrir estrés hídrico [-]

### 3.1.4. Componentes del balance de agua en el suelo: Las necesidades de agua de riego.

Conocidos diferentes parámetros necesarios para estimar la  $ET_c$ , las necesidades hídricas de los mismos estarán ligadas además de a su evapotranspiración al contenido de humedad en el suelo en la zona radicular. Atendiendo a la siguiente es posible diferenciar los diferentes componentes que actúan en el balance de agua.

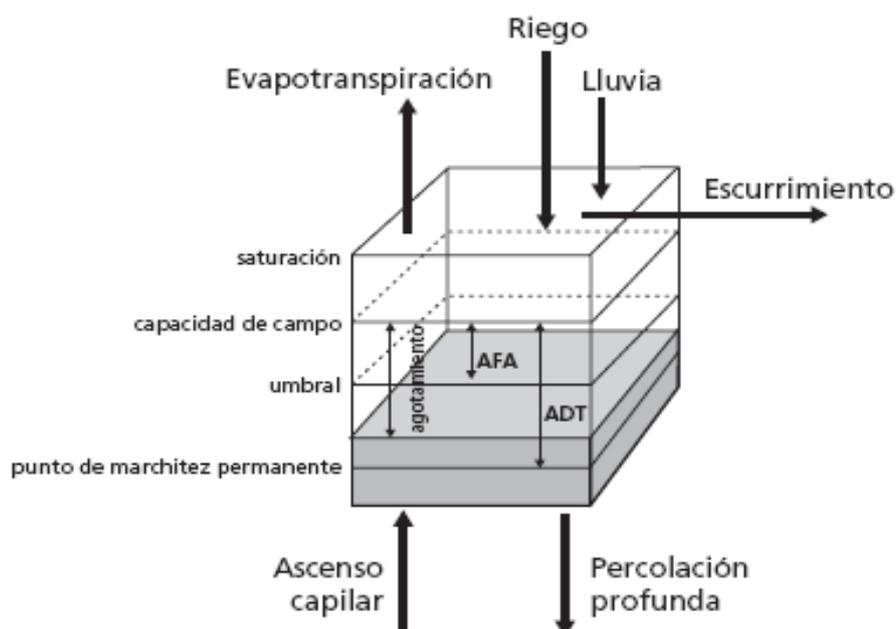


Figura 40. Balance de agua en la zona radicular (Allen et al., 1998)

Según la metodología FAO-56, algunos de estos componentes (procesos de evaporación, transpiración del cultivo y pérdidas por percolación) aumentan el agotamiento de agua, mientras que la precipitación, el ascenso capilar o riego, disminuyen el agotamiento de agua en el suelo. Este balance, ha de ser calculado diariamente mediante:

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad \text{Eq. 8}$$

Donde:

$D_{r,i}$ , es el agotamiento de humedad en la zona radicular del suelo al final del día  $i$  [mm],  
 $D_{r,i-1}$ , es el contenido de humedad en la zona radicular al final del día anterior,  $i-1$  [mm],  
 $P_i$ , es la precipitación en el día  $i$  [mm],  
 $RO_i$ , es el escurrimiento superficial en el día  $i$  [mm],  
 $I_i$ , es la lámina neta de riego en el día  $i$  que infiltra en el suelo [mm],  
 $CR_i$ , es el ascenso capilar proveniente de la mesa de agua subterránea en el día  $i$  [mm],  
 $ET_{c,i}$ , es la evapotranspiración del cultivo en el día  $i$  [mm],  
 $DP_i$ , las pérdidas de agua de la zona radicular por percolación profunda en el día  $i$  [mm],

Por todo ello, las necesidades de riego obtenidas al aplicar la anterior ecuación 7 tienen como objetivo principal la aplicación del agua en suelo en el momento preciso y con la cantidad precisa. Mediante el cálculo del balance diario del agua presente en la zona radicular del suelo se pueden planificar las láminas y los momentos de aplicación del riego. Para evitar el estrés hídrico se debe aplicar el riego antes, o en el momento, de agotarse la lámina de agua fácilmente extraíble del suelo ( $Dr,i \leq AFA$ ). Por otra parte, para evitar pérdidas por percolación que puedan producir el lavado de importantes nutrientes de la zona radicular, la lámina neta de riego deberá ser menor o igual que el agotamiento de humedad en la zona radicular del suelo ( $I_i \leq Dr,i$ )

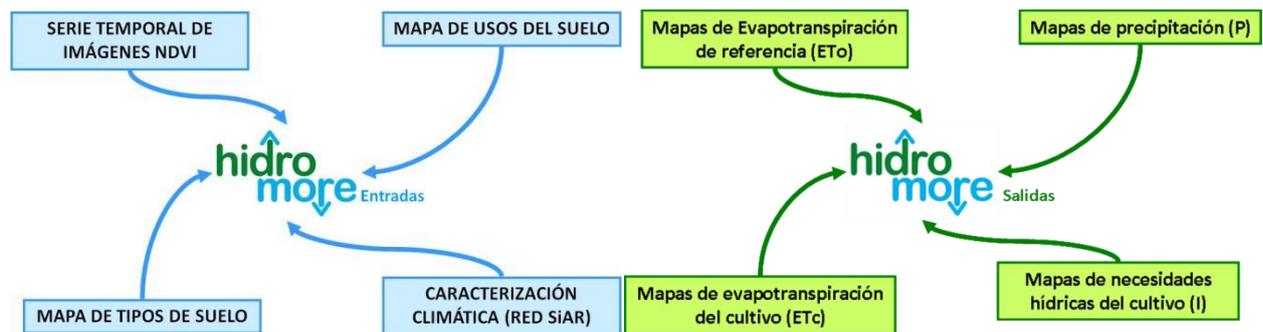
### 3.2. MATERIAL DE ENTRADA

La integración de los anteriores pasos y productos en HidroMORE permite la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos, para su posterior empleo como apoyo en la gestión del agua de los regadíos.

HidroMORE® es un modelo operativo para la estimación de la recarga y la evapotranspiración que integra datos de satélite, meteorológicos, edáficos y de cultivo en el modelo de coeficiente dual FAO56 (Allen et al., 1998a) para la determinación de la evapotranspiración de los cultivos y sus necesidades hídricas (Torres, 2010). Así, HidroMORE® desarrolla a escala diaria y espacialmente distribuido el balance de agua asistido por teledetección. Por tanto, la extensión espacial de estudio se encuentra únicamente limitada por el tamaño de las imágenes de satélite empleadas, mientras que la escala espacial estará en función de la resolución espacial de éstas imágenes. HidroMORE® presenta dos logros principales: la asimilación de datos multispectrales a través de las relaciones NDVI-Kcb y NDVI-

fc; y la distribución espacial del modelo FAO56 (Torres, 2010). Es más, HidroMORE® ha sido aplicado de manera continua en campos diferentes, como su uso operativo para extender datos in-situ de sensores de humedad (Sánchez et al., 2010), como herramienta para modelizar la vegetación natural y los cultivos presentes en el Alto Guadiana (Calera et al., 2011; Calera et al., 2009a), para extender la metodología de los nuevos coeficientes de cultivo basal para viñas en regadío en el acuífero 08.29 (Mancha Oriental), así como extender la metodología de monitorización de cultivos de regadío y obtención de sus necesidades de riego en cuatro grandes cuencas españolas: Júcar, Guadiana, Segura y Tajo (Garrido-Rubio et al., 2012).

HidroMORE® se alimenta de varios tipos de entradas que cuantifican el desarrollo de las coberturas vegetales, las condiciones climáticas, las propiedades hídricas de los suelos y los usos agrícolas que se desarrollan sobre estos. A continuación se muestran la Tabla 21 y la Figura 41, con un resumen de los parámetros empleados y la representación esquemática del proceso de simulación atendiendo a las entradas y salidas o productos obtenidos.



**MONITORIZACIÓN GRANDES ÁREAS: CARTOGRAFÍA TEMÁTICA**

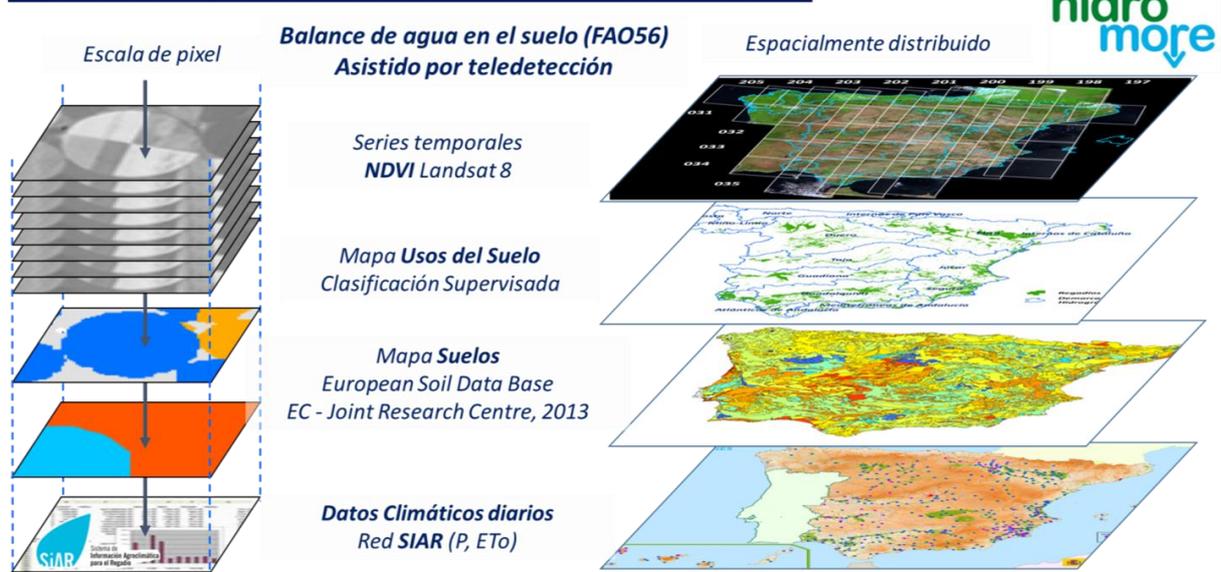


Figura 41. Representación esquemática de las entradas y salidas a HidroMORE

**Tabla 21.** Parámetros de configuración de HidroMORE® y sus fuentes de información.

PARAMETROS DE ENTRADA	FUENTE DE DATOS
Coeficiente basal de cultivo, Kcb (adimensional)	Secuencias temporales de imágenes NDVI procesadas desde la información proporcionada por el satélite Landsat 8
Fracción de suelo cubierta por la vegetación, fcv (adimensional)	
Mapa anual de usos del suelo en regadío	Clasificación temporal supervisada basada en secuencias temporales de imágenes NDVI y cartografía de apoyo
Precipitación diaria, P (mm/día)	Redes agroclimáticas de la Red nacional SIAR (MAGRAMA, 2014), Rural Cat (SMC, 2015) y la Rioja <sup>1</sup> (Rioja, 2015)
Evapotranspiración de referencia diaria, ETo (mm/día)	
Capacidad de campo, $\Theta_{cc}$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	European Soil Database (ESDB) v2.0 (Panagos et al., 2012) y European Soil Derived Data (Hiederer, 2013)
Punto de marchitez, $\Theta_{cc}$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	
Profundidad del suelo, Zmax (m)	
Fracción de agotamiento permisible por tipo de uso en regadío, p (adimensional)	Manual FAO56 (Allen et al., 1998a)
profundidad radicular mínima por tipo de uso en regadío, Zr min (m)	
profundidad radicular máxima por tipo de uso en regadío, Zr max (m)	
Coeficiente de estrés por tipo de regadío, Ks (adimensional)	
Dosis máxima de riego por tipo de uso en regadío, R (mm/d)	
fracción de suelo mojada por lluvia o riego por tipo de uso en regadío, fw (adimensional)	
Periodo de riego por tipo de uso en regadío (días)	

1. Información climática generada por el Gobierno de La Rioja. Consejería de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente. Acceso público y gratuito a través de la web: <http://www.larioja.org/siar>

### 3.3. RESULTADOS DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS POR DEMARCACIONES HIDROGRÁFICAS.

En este apartado se presentan los resultados anuales de las necesidades netas de riego (sin tener en cuenta las diferentes eficiencias), obtenidas tras realizar con HidroMORE® el balance de agua en el suelo asistido por teledetección espacial y temporalmente distribuido. Además, en SPIDERwebGIS® se muestran las series temporales de necesidades de riego agregadas mensualmente.

**Tabla 22.** Superficie regada (ha) y volumen neto anual de riego (hm<sup>3</sup>/año) originado por demarcaciones hidrográficas en 2014 y 2015

Demarcación Hidrográfica	2014		2015	
	Superficie regada (ha)	Volumen de riego (hm <sup>3</sup> )	Superficie regada (ha)	Volumen de riego (hm <sup>3</sup> )
Cuenca Mediterránea Andaluza	73.758	270	79.629	321
Cuencas Internas de Cataluña	76.266	207	81.521	262
Duero	501.670	2.016	557.047	2.248
Ebro	724.822	3.253	762.429	3.698
Guadalete y Barbate	65.500	255	62.609	270
Guadalquivir	695.348	2.061	697.838	2.580
Guadiana	458.591	1.386	482.045	1.605
Júcar	323.741	1.341	352.725	1.212
Miño-Sil	15.067	53	18.390	79
Segura	172.020	713	196.249	778
Tajo	214.182	957	201.378	983
Tinto, Odiel y Piedras	24.713	82	25.197	110

### 3.4. INTEGRACIÓN DE LA RED SIAR EN LA ESTIMACIÓN DIARIA DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS.

Los parámetros agroclimáticos de Precipitación y Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) son otro de los pilares base por el cual llegamos a proporcionar las recomendaciones de las necesidades de agua de riego. Las estaciones de la Red SIAR (Sistema de información Agroclimática para el Regadío), especialmente distribuidas sobre el territorio peninsular e insular, nos proporcionan a escala diaria ambos parámetros. Su consulta ha sido posible mediante la entrega de la información por parte de la Subdirección General de Regadíos y Economía del Agua.

En el trabajo se contará con un total de 414 estaciones de la Red SIAR repartidas sobre el territorio según la siguiente tabla y Figura 1.

**Tabla 23.** Estaciones empleadas por demarcación hidrográfica y sistema de explotación.

Demarcación Hidrográfica	Nº de Estaciones de la Red SIAR
<b>Cuencas mediterráneas andaluzas</b>	23
Duero	49
Ebro	78
Galicia-costa	2
Guadalete y Barbate	8
Guadalquivir	59
Gadriana	37
Júcar	61
Miño-sil	3
Segura	47
Tajo	38
Tinto, Odiel y Piedras	9
<b>Total general</b>	<b>414</b>

A continuación, se especifican las estaciones agroclimatológicas de la Red SIAR que se emplearán para obtener las variables de Precipitación y Evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ). Las siguientes tablas han sido extraídas de la información proporcionada por el MAGRAMA. Es necesario especificar que las coordenadas proporcionadas a continuación están en el Sistema de Referencia European Datum, UTM.

**Tabla 24.** Estaciones de la Red SIAR Demarcación hidrográfica Cuencas Mediterráneas de Andalucía.

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Adra	5	500683	4066780	Almería
Almería	8	553282	4076780	Almería
Almuñecar	33	439384	4067570	Granada
Antequera	457	361021	4099810	Málaga
Archidona	529	373858	4107195	Málaga
Cádir	928	483613	4086360	Granada
Cártama	79	350119	4064780	Málaga
Cuevas de Almanzora	32	606367	4124030	Almería
Estepona	191	301937	4035540	Málaga
Fiñana	958	514311	4112270	Almería
Huércal-Overa	303	598735	4141210	Almería

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
IFAPA Centro de Campanillas	60	360629	4065960	Málaga
IFAPA Churriana	19	365680	4059740	Málaga
Jimena de la Frontera	56	286263	4032470	Cádiz
La Mojonera	140	526376	4071320	Almería
Málaga	58	362741	4068970	Málaga
Níjar	171	574960	4089720	Almería
Padul	752	446599	4097120	Granada
Pizarra	74	346918	4070360	Málaga
Tabernas	507	561998	4105230	Almería
Tíjola	778	547839	4137000	Almería
Vélez-Málaga	35	399039	4072850	Málaga
Zafarraya	893	397321	4094420	Granada

Tabla 25. Estaciones de la Red SIAR Demarcación hidrográfica del Duero.

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Aldearrubia	800	291144	4540570	Salamanca
Almazán	955	541685	4590000	Soria
Arabayona	847	301287	4545470	Salamanca
Barcial del Barco	695	278887	4645820	Zamora
Bustillo del Páramo	855	272071	4705080	León
Ciudad Rodrigo	617	200526	4499280	Salamanca
Colinas de Trasmonte	707	267219	4653680	Zamora
Cubillas de los Oteros	769	293278	4696999	León
Ejeme	816	286463	4517880	Salamanca
Encinas de Esgueva	800	408359	4624500	Valladolid
Finca Zamadueñas	714	358739	4619050	Valladolid
Fuentecantos	1018	547013	4631260	Soria
Fuentes de Nava	741	357805	4660220	Palencia
Gomezerracín	812	391315	4573030	Segovia
Herrera de Pisuerga	807	397065	4704900	Palencia
Hinojosa del Campo	1025	575261	4620820	Soria
Hospital de Orbigo	820	261828	4704910	León
Lantadilla	793	394739	4688970	Palencia



Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
03 Lumbier	484	641305	4725090	Navarra
04 Ancin	469	567870	4722910	Navarra
05 Artajona	360	599223	4715280	Navarra
06 Aibar	420	638209	4713140	Navarra
07 San Martín de Unx	446	614036	4707660	Navarra
08 Miranda de Arga	345	597865	4707230	Navarra
09 Lerin	354	584109	4706200	Navarra
10 Barga	382	557601	4703050	Navarra
11 Olite	375	611150	4699250	Navarra
12 Falces	292	599348	4697420	Navarra
13 Murillo el Fruto	348	624531	4693630	Navarra
14 Traibuenas	312	614023	4690840	Navarra
15 Sartaguda	307	578128	4690400	Navarra
17 Bardenas Reales (El Plano)	437	622106	4683610	Navarra
18 Funes	391	598382	4682430	Navarra
19 Bardenas Reales (Barranco)	298	610873	4680000	Navarra
20 Cadreita	267	605802	4673640	Navarra
21 Corella	392	595908	4663260	Navarra
23 Fitero	436	595781	4655540	Navarra
24 Cascante	346	605623	4654380	Navarra
25 Ablitas	338	612249	4650270	Navarra
26 Los Arcos	421	566963	4709980	Navarra
27 Sesma	456	571792	4702710	Navarra
Agoncillo	342	558225	4701795	La Rioja
Albelda de Iregua	487	543371	4691977	La Rioja
Alcolea de Cinca	225	755554	4625580	Huesca
Aldeanueva de Ebro	365	590273	4674863	La Rioja
Alfántega	249	761432	4634800	Huesca
Alfaro	315	600880	4667180	La Rioja
Almonacid de la Sierra	384	639491	4590290	Zaragoza
Arenzana de Abajo	523	522557	4693182	La Rioja
Ausejo		569654	4687765	La Rioja
Banastón	560	760884	4697990	Huesca
Barbastro	409	757738	4655960	Huesca
Belchite	327	690604	4580150	Zaragoza

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Boquiñeni	227	645315	4633850	Zaragoza
Borja	378	623871	4634770	Zaragoza
Calahorra	328	582125	4687227	La Rioja
Calanda	439	734842	4538190	Teruel
Calatayud	523	615873	4579970	Zaragoza
Candasnos	307	758445	4594440	Huesca
Casalarreina	510	508359	4709480	La Rioja
Caspe	175	745204	4576640	Zaragoza
Cervera - Cabretón	495	591713	4651141	La Rioja
Condado de Treviño	562	517719	4732000	Burgos
Daroca	748	632270	4551950	Zaragoza
Ejea de los Caballeros	316	649166	4662200	Zaragoza
El Bayo	386	644635	4670770	Zaragoza
Épila	330	643204	4604930	Zaragoza
Fabara	253	764603	4562190	Zaragoza
Foncea	669	496868	4717207	La Rioja
Fraga	98	779969	4599160	Huesca
Grañén	323	719175	4646770	Huesca
Gurrea de Gállego	364	687923	4651470	Huesca
Híjar	306	707114	4565610	Teruel
Huerto	415	737282	4647970	Huesca
Huesca	432	716821	4664810	Huesca
Igea	564	583260	4656678	La Rioja
Lanaja	361	721218	4629490	Huesca
Leiva	595	495872	4704901	La Rioja
Logroño	465	539894	4698503	La Rioja
Luna	409	670687	4662470	Zaragoza
Monreal del Campo	950	638782	4515730	Teruel
Montañana	217	681037	4620270	Zaragoza
Monte Julia	274	768745	4626240	Huesca
Osera de Ebro	251	705486	4602200	Zaragoza
Pastriz	182	689157	4607210	Zaragoza
Pazuengos	1299	506993	4687608	La Rioja
Puig Moreno	322	731894	4553190	Teruel
Quel (Antes Autol)	430	579423	4678259	La Rioja

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Quinto	240	707465	4584840	Zaragoza
Rincón de Soto	277	594688	4678140	La Rioja
Sádaba	433	639427	4680840	Zaragoza
San Adrian	382	590570	4690180	Navarra
San Esteban de Litera	316	774164	4642060	Huesca
San Vicente de la Sonsierra	543	521845	4712548	La Rioja
Santa Cilia de Jaca	733	688103	4716400	Huesca
Santa Engracia	570	560581	4690798	La Rioja
Santa Engracia (Tauste)	237	640172	4640690	Zaragoza
Santa Gadea del Cid	525	493844	4727710	Burgos
Santo Domingo de la Calzada	640	504745	4697860	La Rioja
Sariñena	291	734668	4628250	Huesca
Selgua	310	759185	4647810	Huesca
Sodeto	318	727565	4640530	Huesca
Tamarite de Litera	218	780662	4630970	Huesca
TARAZONA	522	604000	4641230	Zaragoza
Tardienta	366	706522	4649380	Huesca
Tauste	353	653808	4651470	Zaragoza
Torremontalbo-Uruñuela	465	523509	4700894	La Rioja
Torres de Berrellén	207	660909	4625030	Zaragoza
Tudela	243	617647	4661120	Navarra
Valfarta	359	737942	4601690	Huesca
Valle de Losa	635	480749	4757130	Burgos
Villar de Torre	727	511453	4691834	La Rioja
Villarquemado	990	644881	4487500	Teruel
Zaidín	182	773947	4614720	Huesca
Zuera	288	685330	4639810	Zaragoza

**Tabla 27.** Estaciones de la Red SIAR Demarcación hidrográfica de Galicia-Costa.

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
A Capela	374	90970,6	4822990	A Coruña
Boimorto	429	81094,2	4777420	A Coruña

**Tabla 28.** Estaciones de la Red SIAR Demarcación hidrográfica de Guadalete y Barbate.

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Basurta-Jerez de la Frontera	42	230650	4072170	Cádiz
Conil de la Frontera	24	218803	4025430	Cádiz
IFAPA Centro de Chipiona	7	196448	4072630	Cádiz
Jerez de la Frontera	19	230594	4059470	Cádiz
Puerto de Santa María	0	216930	4055730	Cádiz
Sanlúcar de Barrameda	32	202554	4068870	Cádiz
Vejer de la Frontera	14	244927	4019310	Cádiz
Villamartín	149	266049	4080680	Cádiz

**Tabla 29.** Estaciones de la Red SIAR Demarcación hidrográfica del Guadalquivir.

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Adamuz	145	373099	4206530	Córdoba
Alcaudete	639	404780	4159460	Jaén
Almonte	12	191221	4116990	Huelva
Almonte bajo plástico	20	189541	4118550	Huelva
Almonte bajo plástico	24	186434	4110360	Huelva
Almonte bajo plástico Frb	23	185851	4110940	Huelva
Aznalcázar	4	209287	4116730	Sevilla
Baena	319	384851	4172400	Córdoba
Baza	718	520514	4157520	Granada
Bélmez	504	306667	4236350	Córdoba
Chiclana de Segura	488	500305	4239420	Jaén
Córdoba	93	341399	4191480	Córdoba
Ecija	113	316625	4162680	Sevilla
El Carpio	170	367791	4197330	Córdoba
Guillena	50	229175	4156370	Sevilla
Hornachuelos	134	309617	4176930	Córdoba
Huéjana	1110	503240	4118727	Granada
Huesa	755	494567	4177790	Jaén
IFAPA Centro Las Torres-Tomejil	14	238016	4155860	Sevilla
IFAPA Centro Camino del	630	443311	4114150	Granada

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
<b>Purchil</b>				
IFAPA Centro de Cabra	547	373516	4151100	Córdoba
IFAPA Centro de Los Palacios	12	238484	4119600	Sevilla
IFAPA Centro Las Torres-Tomejil. Finca Tome	79	270958	4142490	Sevilla
IFAPA Centro Mengibar	292	430790	4199560	Jaén
Isla Mayor	5	222653	4112040	Sevilla
Iznalloz	925	451202	4141210	Granada
Jaén	301	432183	4193960	Jaén
Jerez del Marquesado	1200	486699	4116020	Granada
Jódar	488	470605	4192400	Jaén
La Higuera de Arjona	258	411463	4200610	Jaén
La Luisiana	175	303108	4155460	Sevilla
La Puebla del Río	4	221954	4124550	Sevilla
La Puebla del Río II	3	229178	4108110	Sevilla
La Rinconada	27	241295	4149570	Sevilla
Las Cabezas de San Juan	15	243351	4100490	Sevilla
Lebrija I	5	221723	4096850	Sevilla
Linares	435	443002	4212540	Jaén
Loja	466	398957	4114260	Granada
Lora del Río	47	275891	4171230	Sevilla
Los Molares	78	262696	4117760	Sevilla
Mancha Real	413	447571	4196710	Jaén
Marmolejo	0	396245	4211910	Jaén
Osuna	200	310675	4125300	Sevilla
Palma del Río	57	303720	4177720	Córdoba
Pinos Puente	577	431438	4124200	Granada
Pozo Alcón	882	506163	4169420	Jaén
Puebla Cazalla	194	291408	4121660	Sevilla
Puebla de Don Fadrique	1017	554375	4192250	Granada
Sabiote	800	479346	4214660	Jaén
San José de los Propios	503	479742	4190080	Jaén
Sanlúcar La Mayor	66	211943	4146640	Sevilla
Santaella	199	333382	4154500	Córdoba
Santo Tomé	537	492726	4209060	Jaén

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Sierra Yeguas	470	336928	4111800	Málaga
Torreblascopedro	274	439469	4204790	Jaén
Torreperogil	536	478573	4203000	Jaén
Ubeda	344	473599	4199520	Jaén
Villacarrillo	650	482408	4212870	Jaén
Villanueva del Río y Minas	0	262609	4164000	Sevilla

Tabla 30. Estaciones de la Red SIAR Demarcación hidrográfica del Guadiana.

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
ALCÁZAR DE SAN JUAN	653	482729	4340120	Ciudad Real
Aliseda	327	186520	4353590	Cáceres
Argamasilla de Alba	704	495018	4325230	Ciudad Real
Aroche	291	153376	4208510	Huelva
ARROYO	221	198644	4306780	Badajoz
Azuaga	540	263512	4252720	Badajoz
BERCIAL	188	167915	4310100	Badajoz
Bolaños	642	446145	4311320	Ciudad Real
CIUDAD REAL	613	414362	4321940	Ciudad Real
Daimiel	631	440016	4317940	Ciudad Real
Don Benito	268	248957	4312730	Badajoz
DON BENITO-EFA	260	252360	4318970	Badajoz
EL SANCHÓN	717	560667	4357420	Cuenca
Fuente de Cantos	600	210378	4234130	Badajoz
GUADALUPE	740	297766	4362370	Cáceres
Herencia	641	471540	4358890	Ciudad Real
IFAPA Centro de Hinojosa del Duque	543	315518	4263000	Córdoba
Jerez de los Caballeros	266	173113	4243640	Badajoz
JUANACO	708	529582	4346370	Albacete
LA ORDEN	188	181923	4307650	Badajoz
La Puebla de Almoradiel	682	488335	4384360	Toledo
La Puebla de Guzmán	251	124659	4164620	Huelva
Madrigalejo	293	275671	4335060	Cáceres
MANZANARES	645	469428	4330470	Ciudad Real

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Mérida	265	211917	4304830	Badajoz
Monterrubio de la Serena	484	292404	4274150	Badajoz
Montiel	887	510308	4283170	Ciudad Real
Olivenza	202	147185	4293630	Badajoz
PALAZUELO	269	262837	4331710	Badajoz
PEDERNOSO	700	520738	4369320	Cuenca
PORZUNA	614	393782	4343510	Ciudad Real
Puebla de Alcocer	500	318722	4327150	Badajoz
RUEDA CHICA	189	176326	4313750	Badajoz
Santa Amalía	248	241514	4322470	Badajoz
Villafranca de los Barros	406	208280	4275000	Badajoz
Villagonzalo	252	223468	4303540	Badajoz
Zalamea de la Serena	457	265910	4284560	Badajoz

Tabla 31. Estaciones de la Red SIAR Demarcación hidrográfica del Júcar.

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Agost	284	705166	4255200	Alicante
ALBACETE	689	595166	4311730	Albacete
Algemesí	19	721413	4343930	Valencia
ALMANSA	681	664097	4307740	Albacete
Altea	78	754320	4276840	Alicante
BÉLGIDA	281	720841	4306490	Valencia
Benavites	2	738572	4401540	Valencia
Benicarló	18	788624	4478990	Castellón
Benifaió	44	718925	4350990	Valencia
Bétera	97	717423	4386260	Valencia
Bolbaita	267	699829	4326990	Valencia
Burriana	98	747478	4419320	Castellón
Callosa d'en Sarrià	163	751970	4281914	Alicante
Callosa d'en Sarrià (malla)	163	751980	4281944	Alicante
Camp de Mirra	595	693720	4283550	Alicante
Campo Arcís	584	657938	4366610	Valencia
Cañete	1037	615188	4431790	Cuenca
Carcaixent EEA	20	720802	4332489	Valencia

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Carlet CE Coop	64	711835	4344773	Valencia
Castelló Benadresa	88	745965	4430550	Castellón
Caudete	585	675585	4289270	Albacete
Cheste	322	693888	4376790	Valencia
Chulilla	378	685917	4394130	Valencia
Dénia Gata	85	767731	4298290	Alicante
El Picazo	705	578157	4367640	Cuenca
Elx EEA	62	701609	4235864	Alicante
Gandia Marxuquera	108	738207	4316410	Valencia
GODELETA	270	699949	4366120	Valencia
La Gineta	696	585237	4328310	Albacete
Llíria	244	703474	4396160	Valencia
Llutxent EEA	295	728810	4313267	Valencia
Manises	71	715439	4373565	Valencia
Mariana	941	573120	4445040	Cuenca
Moncada IVIA	58	723368	4385233	Valencia
Monforte del Cid	259	698193	4252510	Alicante
Montesa	247	704640	4314380	Valencia
Motilleja	681	606281	4335780	Albacete
Nules	35	742155	4417970	Castellón
Onda	114	739849	4427960	Castellón
Ondara	39	761033	4300940	Alicante
Pedralba	241	696061	4382190	Valencia
Picassent	92	715588	4359990	Valencia
Planes	438	729927	4296220	Alicante
Polinyá de Xúquer	4	727749	4341700	Valencia
Pozo Cañada	829	608178	4295250	Albacete
Requena Cerrito	748	651972	4374274	Valencia
Ribera de Cabanes	34	768076	4447370	Castellón
Sagunt	9	732200	4392210	Valencia
San Rafael del Río	205	784970	4499150	Castellón
Segorbe	348	715427	4410510	Castellón
TARAZONA	722	593160	4345720	Albacete
Tavernes de Valldigna	4	738862	4330980	Valencia
Teruel	914	655755	4467910	Teruel

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Vall d'Uixó	107	737127	4408770	Castellón
Vila Joiosa	81	739183	4267960	Alicante
Vila-real EEA	67	744577	4425569	Castellón
Villalonga	87	742476	4308520	Valencia
Villanueva de Castellón	40	714192	4326970	Valencia
Villanueva de la Jara	780	599274	4362320	Cuenca
Villena	495	685028	4274030	Alicante
Xàtiva	106	712192	4319500	Valencia

**Tabla 32.** Estaciones de la Red SIAR Demarcación hidrográfica del Miño-Sil.

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Carracedelo	480	195585	4719674	León
Castro de Rei	414	134760	4788070	Lugo
Monforte de Lemos	332	130127	4715890	Lugo

**Tabla 33.** Estaciones de la Red SIAR Demarcación hidrográfica del Segura.

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Abanilla (La Jaira)	140	670466	4226410	Murcia
Alhama (La Calavera)	168	639382	4183910	Murcia
Almoradí	62	695318	4211640	Alicante
Beniel	29	675543	4211530	Murcia
Blanca (Estación de Blanca)	280	647927	4233290	Murcia
Calasparra (Rotas)	276	614200	4234750	Murcia
Caravaca (Barranda)	867	588685	4211200	Murcia
Casa Rosa de Ulea	241	652563	4228480	Murcia
Catral	10	692275	4225080	Alicante
Cehégín (El Chaparral)	431	615442	4219040	Murcia
Cehégín (La Torrecita)	511	606971	4218100	Murcia
Charco de Taray	205	661845	4225290	Murcia
Cieza (La Carrichosa)	253	631283	4239070	Murcia
Corvera	229	665199	4188760	Murcia
Crevillente	94	694006	4234860	Alicante
Finca experimental de Aguilas (CIDA)	35	624578	4142250	Murcia

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Finca experimental de Totana (CIDA)	237	631022	4177170	Murcia
Finca Taray (Torres de cotillas)	165	649023	4207950	Murcia
Finca Venta de Ulea-Moratalla	458	603922	4228300	Murcia
Forja, S.A.-Fuente Alamo	137	664814	4179530	Murcia
Fuente Alamo (Campillo bajo)	175	655351	4173880	Murcia
Jumilla (C <sup>a</sup> del Judío)	395	637693	4250800	Murcia
Jumilla (Las Encebras)	400	653748	4251050	Murcia
Jumilla (Roman)	340	646370	4242420	Murcia
La Aljorra	92	670131	4171690	Murcia
Librilla	166	646098	4195950	Murcia
Mazarrón (Cañada Gallego)	94	644683	4159260	Murcia
Molina de Segura (Campotejar)	146	655952	4221450	Murcia
Mula (Mula)	275	634434	4211270	Murcia
Murcia (Cabezo Plata)	128	677088	4205240	Murcia
Murcia (La Alberca)	54	663918	4200810	Murcia
Ontur	659	630946	4276000	Albacete
Orihuela la Murada	96	679135	4227960	Alicante
Pilar de la Horadada	55	692408	4193490	Alicante
Pinoso	608	669278	4255020	Alicante
Puerto Lumbreras	356	615445	4151560	Murcia
Puerto Lumbreras (El Esparragal)	318	612404	4160930	Murcia
Purias-Lorca	325	620981	4162510	Murcia
San Javier (El Mirador)	93	686091	4190860	Murcia
San Javier (Santiago de la Ribera)	6	691865	4184730	Murcia
Torre Pacheco (Los Infiernos)	90	682044	4188290	Murcia
Torre Pacheco (Torre Blanca)	32	685067	4182780	Murcia
Torre Pacheco (Torre Pacheco)	56	677368	4179730	Murcia

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Turilla: La Paca	693	604002	4190450	Murcia
Virgen de Fátima-Cuevas de Almanzora	176	608847	4138750	Almería
Yecla	658	657845	4280490	Murcia
Yecla (Pinillos)	567	664448	4269940	Murcia

Tabla 34. Estaciones de la Red SIAR Demarcación hidrográfica del Tajo.

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
ALCANTARA	327	165984	4406900	Cáceres
Alcolea de Tajo	366	316736	4409360	Toledo
Aldehuela del Jerte	270	224276	4433680	Cáceres
Aranjuez	487	446220	4432570	Madrid
Arganda	531	457693	4462410	Madrid
Armuña de Tajuña	739	498822	4486630	Guadalajara
Barajas de Melo	690	505412	4440510	Cuenca
Casatejada	267	270943	4416520	Cáceres
Center Finca experimental	555	457867	4473610	Madrid
Chinchón	534	460101	4449200	Madrid
Coria-Puebla de Argeme	240	204857	4429512	Cáceres
Fuentidueña de Tajo	558	485039	4439740	Madrid
Gargantilla	589	249780	4458440	Cáceres
Hurdes-Azabal	480	219034	4466140	Cáceres
Illana	581	501171	4450960	Guadalajara
JADRAQUE	785	504494	4530680	Guadalajara
Jarandilla de la Vera	493	274430	4442370	Cáceres
La Rinconada	432	379873	4410060	Toledo
Los Navalmorales	717	357973	4398280	Toledo
Madroñera	625	262362	4372010	Cáceres
MAGAN	507	419484	4420980	Toledo
Marchamalo	693	482270	4503340	Guadalajara
Mirabel	541	225349	4416430	Cáceres
Mora	735	433719	4390830	Toledo
Moraleja	272	185457	4441660	Cáceres
Peraleda de la Mata	321	289240	4415250	Cáceres
Prados Redondos	1129	601354	4516820	Guadalajara

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Recas	590	416575	4434450	Toledo
San Martín de la Vega	516	452366	4453800	Madrid
Talayuela	271	281141	4432150	Cáceres
Valdastillas	489	255608	4447377	Cáceres
Valdeñigos-Tejeda de Tíetar	234	255708	4427240	Cáceres
Valdesalor	383	213209	4362880	Cáceres
VEGAS DE SAN ANTONIO	388	354803	4424260	Toledo
Villa del Prado	465	391738	4456390	Madrid
Villaconejos de Trabaque	795	557292	4473880	Cuenca
Villarubia de Santiago	543	471476	4431690	Toledo
Zarza de Granadilla	354	241859	4455280	Cáceres

Tabla 35. Estaciones de la Red SIAR Demarcación hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras.

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
El Campillo	387	182491	4174300	Huelva
El Tojalillo-Gibraleón	38	143043	4137800	Huelva
Gibraleón	148	140652	4148360	Huelva
IFAPA Centro Las Torres-Tomejil. Finca El C	63	162674	4128310	Huelva
IFAPA El Cebollar Bajo plastico	63	162775	4128400	Huelva
La Palma del Condado	171	186354	4141470	Huelva
Lepe	53	123877	4136900	Huelva
Moguer	55	163137	4117860	Huelva
Niebla	28	169098	4139930	Huelva

### 3.5. INTEGRACIÓN DE LA RED DE ESTACIONES AGROMETEOROLÓGICAS DE CATALUÑA

**Tabla 36.** Estaciones del servicio de Agrometeorología de Cataluña.

Nombre de la estación	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Aitona	97	288002	4595926	Lleida
Albesa	267	306325	4625793	Lleida
Alcanar	24	290309	4492625	Tarragona
Alcarràs	122	295736	4604389	Lleida
Aldover	52	289732	4526141	Tarragona
Alfarràs	268	298816	4632572	Lleida
Algerri	301	304604	4630361	Lleida
Alguaire	370	295094	4624156	Lleida
Amposta	3	299970	4509013	Tarragona
Anglès	150	469428	4645506	Girona
Ascó	257	291337	4563551	Tarragona
Baldomar	366	336564	4642964	Lleida
Banyoles	176	482615	4662735	Girona
Barcelona - el Raval	33	430414	4581709	Barcelona
Barcelona - Observatori Fabra	411,2	426785	4585579	Barcelona
Batea	382	274794	4551847	Tarragona
Benissanet	32	301295	4548433	Tarragona
Cabanes	31	496276	4683806	Girona
Cabrils	81	448018	4596420	Barcelona
Cadí Nord	2143	394066	4683069	Lleida
Caldes de Montbui	176	430709	4607105	Barcelona
Camarasa	668	324341	4642820	Lleida
Canaletes	325	390919	4593443	Barcelona
Cassà de la Selva	171	493937	4635843	Girona
Castell d'Aro	14	502692	4628523	Girona
Castellbisbal	147	414461	4592431	Barcelona
Castellans	228	312540	4599934	Lleida
Castellnou de Bages	507	404257	4631648	Barcelona
Castellnou de Seana	264	329453	4613676	Lleida
Cervera	554	358169	4615156	Lleida
Constantí	112	346301	4559391	Tarragona
Cunit	17	385422	4562067	Tarragona

Nombre de la estación	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Das	1097	406687	4693263	Girona
Dosrius	460	453790	4607726	Barcelona
el Canós	429	350520	4616849	Lleida
El Masroig	141	308749	4554835	Tarragona
el Perelló	179	307520	4527157	Tarragona
El Poal	223	323310	4615624	Lleida
El Pont de Suert	823	314297	4696446	Lleida
el Pont de Vilomara	210	406216	4617790	Barcelona
El Prat de Llobregat	8	423044	4576960	Barcelona
El Vendrell	59	376036	4563738	Tarragona
Els Alamús	235	311234	4607314	Lleida
els Alfacs	0	302023	4500014	Tarragona
Els Hostalets de Pierola	316	400570	4598402	Barcelona
Espot	2519	340252	4710916	Lleida
Falset	359	317040	4558115	Tarragona
Font-rubí	415	385024	4587731	Barcelona
Gandesa	349	284069	4549245	Tarragona
Gimenells	259	282935	4615105	Lleida
Girona	72	484000	4647821	Girona
Golmés	261	327129	4611490	Lleida
Guardiola de Berguedà	788	407160	4676386	Barcelona
Gurb	509	436407	4644758	Barcelona
Horta de Sant Joan	515	273222	4536852	Tarragona
Isla de Buda	0,5	317067	4508508	Tarragona
La Bisbal d'Empordà	28,6	502935	4647279	Girona
La Granada	240	393664	4580189	Barcelona
La Granadella	505	304930	4581336	Lleida
la Panadella	785	366727	4606887	Barcelona
La Pobla de Segur	513,3	332041	4678363	Lleida
La Quar	873	414176	4659215	Barcelona
La Seu d'Urgell	849	370961	4692140	Lleida
La Tallada d'Empordà	15	505127	4655771	Girona
La Vall d'en Bas	461	454927	4666083	Girona
Lac Redon	2247	317899	4723047	Lleida
l'Aldea	62	298826	4515900	Tarragona

Nombre de la estación	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
L'Ametlla de Mar	93	312141	4531061	Tarragona
L'Espluga de Francolí	446	341066	4584063	Tarragona
Lladurs	785	369980	4660681	Lleida
Lleida - la Bordeta	165	304032	4607840	Lleida
Maials	350	289280	4581496	Lleida
Malgrat de Mar	2	479729	4610620	Barcelona
Margalef	404	311904	4572853	Tarragona
Mollerussa	247	322695	4609571	Lleida
Molló	1405	451803	4691821	Girona
Monells	60	499755	4647251	Girona
Montsec d'Ares	1572	312110	4657966	Lleida
Muntanyola	816	431854	4636571	Barcelona
Núria	1971	430471	4694366	Girona
Òdena	333	387729	4604734	Barcelona
Oliana	490	360609	4659680	Lleida
Oliola	443	346830	4637760	Lleida
Olot	421,5	457282	4671162	Girona
Organyà	566,5	362270	4675133	Lleida
Orís	626	434535	4658293	Barcelona
Pantà de Riba-roja	69	284872	4569039	Tarragona
Parets del Vallès	123	435482	4602030	Barcelona
PN del Garraf - el Rascler	573	408541	4571339	Barcelona
PN dels Ports	1055	273755	4519689	Tarragona
Portbou	196	513672	4698105	Girona
Prades	928	331056	4575670	Tarragona
Puig Sesolles	1668	453270	4624795	Barcelona
Raimat	286	287655	4617757	Lleida
Rellinars	421	409809	4609581	Barcelona
Riudoms	158	333712	4555899	Tarragona
Roses	24	514980	4679843	Girona
Sabadell	258	422418	4601974	Barcelona
Salòria (2.451 m)	2451	365778	4708739	Lleida
Sant Llorenç Savall	528	418973	4614849	Barcelona
Sant Martí de Riucorb	413	340610	4604062	Lleida
Sant Martí Sarroca	257	385462	4581282	Barcelona

Nombre de la estación	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Sant Pau de Segúries	852	447566	4678661	Girona
Sant Pere Pescador	4	507995	4669451	Girona
Sant Romà d'Abella	690	337940	4667097	Lleida
Sant Sadurní d'Anoia	164	399265	4587623	Barcelona
Sant Salvador de Guardiola	349	397445	4614314	Barcelona
Santa Coloma de Farners	162	472152	4634829	Girona
Santuari de Queralt	1167	402992	4662362	Barcelona
Seròs	89	285176	4593439	Lleida
Solsona	691	376713	4649477	Lleida
Tàrrega	427	347015	4614430	Lleida
Tornabous	291	337280	4617022	Lleida
Torredembarra	2	367284	4556255	Tarragona
Torres de Segre	215	295831	4599275	Lleida
Torroella de Fluvià	6	505084	4669962	Girona
Torroja del Priorat	300	315366	4565107	Tarragona
Ulldecona - los Valentins	210	277652	4500622	Tarragona
Ulldemolins	687	323042	4576437	Tarragona
Vallfogona de Balaguer	238	319626	4628169	Lleida
Vallirana	252	411004	4581707	Barcelona
Viladecans	3	419450	4572427	Barcelona
Viladrau	953	451743	4632184	Girona
Vilanova de Meià	594	336477	4651157	Lleida
Vilanova de Segrià	222	302707	4620796	Lleida
Vila-rodona	287	362931	4574162	Tarragona
Vinebre	108	298191	4562085	Tarragona
Vinyols i els Arcs	29	337591	4549457	Tarragona







## BIBLIOGRAFÍA EMPLEADA

- Allen, R., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998a. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Roma, Italy.
- Allen, R.G., 2011. Skin layer evaporation to account for small precipitation events—An enhancement to the FAO-56 evaporation model. *Agricultural Water Management* 99, 8-18.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Howell, T.A., Jensen, M.E., 2011. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management* 98, 899–920.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998b. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. *Irrigation and Drainage Paper No. 56*, FAO, Rome, Italy.
- Bastiaanssen, W.G.M., Molden, D.J., Makin, I.W., 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management* 46, 137-155.
- Calera, A., Castaño Fernández, S., Quintanilla, A., Odi, M., Belmonte, M., Arellano, I., Jiménez-Martínez, N., 2011. Estudio sobre la Evapotranspiración y el agua de Riego aplicada sobre las superficies de regadío mediante teledetección en los acuíferos sobreexplotados del Alto Guadiana. Años 2005, 2009 y 2010. Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), Albacete, p. 131.
- Calera, A., Castaño Fernández, S., Quintanilla, A., Torres, E.A., Campos, I., Belmonte, M., Arellano, I., Garrido-Rubio, J., 2009a. Estudio sobre la Evapotranspiración y el agua de Riego aplicada sobre las superficies de regadío mediante teledetección en las masas 04.04 y 04.06. Alto Guadiana. Años 2007 y 2008. Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), Albacete, p. 98.

- Calera, A., Garrido-Rubio, J., Saiz, J., Sánchez, J., 2009b. Interpolación normalizada de imágenes procedentes de múltiples sensores. Sección de Teledetección y SIG. IDR-Albacete (UCLM). Albacete, p. 48.
- Calera, A., Jochum, A., García, A., Rodríguez, A., Fuster, P., 2005. Irrigation management from space: Towards user-friendly products. *Irrig Drainage Syst* 19, 337-353.
- Calera, A., Vela Mayorga, A., Castaño Fernández, S., 1999. GIS tools applied to the sustainable management of water resources: Application to the aquifer system 08-29. *Agricultural Water Management* 40, 207-220.
- Campos, I., Calera, A., Balbontin, C., Torres, E.A., González-Piqueras, J., Neale, C.M.U., 2010a. Basal crop coefficient from remote sensing assessment in rain-fed grapes in southeast Spain, *Remote sensing and hydrology*. IAHS, Jackson Hole (WY). USA, pp. 397-400.
- Campos, I., Calera, A., Balbotín, C., Torres, E.A., González-Piqueras, J., Neale, C.M.U., 2010b. Basal Crop Coefficient From Remote Sensing Assessment in Rain-Fed Grapes in Southeast Spain, in: *Sciences*), I.I.A.o.H. (Ed.), *Remote Sensing and Hydrology 2010 Symposium*, Jackson Hole, Wyoming, pp. 397-400.
- Campos, I., Neale, C.M.U., Calera, A., Balbontin, C., González-Piqueras, J., 2010c. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agricultural Water Management* 98, 45-54.
- Campos, I., Neale, C.M.U., Calera, A., Balbontín, C., González-Piqueras, J., 2010d. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agricultural Water Management* 98, 45-54.

- Consoli, S., Barbagallo, S., 2012. Estimating Water Requirements of an Irrigated Mediterranean Vineyard Using a Satellite-Based Approach. *Irrig Sci* 138, 896-904.
- Cuesta, A., Montoro, A., Jochum, A.M., López, P., Calera, A., 2005. Metodología operativa para la obtención del coeficiente de cultivo desde imágenes de satélite. *ITEA : Información Técnica Económica Agraria* 101, 212-224.
- Chander, G., Markham, B.L., Helder, D.L., 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment* 113, 893-903.
- Chen, X., Vierling, L., Deering, D., 2005. A simple and effective radiometric correction method to improve landscape change detection across sensors and across time. *Remote Sensing of Environment* 98, 63-79.
- Choudhury, B.J., Ahmed, N.U., Idso, S.B., Reginato, R.J., Daughtry, C.S.T., 1994. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sensing of Environment* 50, 1-17.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper No. 24*, FAO, Rome, Italy.
- European Commission, 2012. REPORT FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL on the Implementation of the Water Framework Directive (2000/60/EC) River Basin Management Plans.

- European Parliament, 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy (<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32000L0060>).
- Forney, W.M., Raunikar, R.P., Bernknopf, R.L., Mishra, S.K., 2012. An economic value of remote-sensing information -- Aplicación to agricultural production and maintaining groundwater quality. Professional Paper 1796, 60.
- Garrido-Rubio, J., Campos, I., Villa, G., Plaza, N., Calera, A., 2011. INTERPOLA. Herramienta para la generación de imágenes sintéticas y sustitución de valores reales con presencia de nubes-sombras por valores interpolados, XIV Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Mieres, Asturias, Spain, p. 4.
- Garrido-Rubio, J., Rodríguez, J., Madurga, C., Fraile, L., Calera, A., González, L., Jiménez-Martínez, N., Arellano, I., Campos, I., Odi, M., Moreno-Rivera, J.M., 2012. Integración de la red SIAR e imágenes de satélite en la estimación de las necesidades de agua de riego. Aplicación al Center y su extensión a grandes áreas, XXX Congreso Nacional de Riegos, Albacete, p. 10.
- Glenn, E.P., Neale, C.M.U., Hunsaker, D.J., Nagler, P.L., 2011a. Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems. Hydrological Processes 25, 4050-4062.
- Glenn, E.P., Neale, C.M.U., Hunsaker, D.J., Nagler, P.L., 2011b. Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems. Hydrological Processes 25, 4050-4062.

- Gonzalez-Dugo, M.P., Neale, C.M.U., Mateos, L., Kustas, W.P., Prueger, J.H., Anderson, M.C., Li, F., 2009. A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 1843-1853.
- González-Piqueras, J., 2006. Evapotranspiración de la cubierta vegetal mediante la determinación del coeficiente de cultivo por Teledetección. Extensión a escala regional: Acuífero 08.29 Mancha Oriental.
- Heilman, J.L., Heilman, W.E., Moore, D.G., 1982. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. *Agronomy Journal* 74, 967-971.
- Hiederer, R., 2013. Mapping Soil Properties for Europe - Spatial Representation of Soil Database Attributes, Publications Office of the European Union, Scientific and Technical Research series. Joint Research Center, Luxembourg, p. 47.
- MAGRAMA, 2014. SiAR, Sistema de información Agroclimática para el Regadío (<http://eportal.magrama.gob.es/websiar/Inicio.aspx>).
- Martínez, C., 2014. Observación multispectral de la cubierta vegetal mediante Teledetección. Aplicación a Castilla-La Mancha. UCLM (Universidad de Castilla-La Mancha), Albacete.
- Miller, H.M., Sexton, N.R., Koontz, L., Loomis, John, Koontz, S.R., Hermans, C., 2011. The users, uses, and value of Landsat and other moderate-resolution satellite imagery in the United States. Executive report. Open-File Report 2011-1031, 43.
- Moran, M.S., Inoue, Y., Barnes, E.M., 1997. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Remote Sensing of Environment* 61, 319-346.

- Neale, C.M.U., Bausch, W.C., Heerman, D.F., 1989. Development of reflectance-based crop coefficients for corn Transactions of the ASAE 32, 1891-1899.
- Panagos, P., Van Liedekerke, M., Jones, A., Montanarella, L., 2012. European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements. Land Use Policy 29, 329-338.
- Rioja, G.d.L., 2015. Consejería de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente. Servicio de Información Agroclimática de La Rioja (<http://www.larioja.org/siar>).
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Deering, D.W., Schell, J.A., 1973. Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. Remote Sensing Center. College Station.
- Sánchez, N., Martínez-Fernández, J., Calera, A., Torres, E., Pérez-Gutiérrez, C., 2010. Combining remote sensing and in situ soil moisture data for the application and validation of a distributed water balance model (HIDROMORE). Agricultural Water Management 98, 69-78.
- Schroeder, T.A., Cohen, W.B., Song, C., Canty, M.J., Yang, Z., 2006. Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon. Remote Sensing of Environment 103, 16-26.
- Serbina, L., Holly, M.M., 2014. Landsat and Water — Case Studies of the Uses and Benefits of Landsat Imagery in Water Resources. 61.
- SMC, S.M.d.C., 2015. RuralCat, Datos agrometeorológicos (<http://www.ruralcat.net/>).
- Torres, E.A., 2010. El modelo FAO-56 asistido por satélite en la estimación de la evapotranspiración en un cultivo bajo estrés hídrico y en suelo desnudo. Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM).

- Torres, E.A., Calera, A., 2010. Bare soil evaporation under high evaporation demand: a proposed modification to the FAO-56 model. *Hydrological Sciences Journal* 55, 303-315.
- Van Leeuwen, C., Tregcoat, O., Choné, X., Bois, B., Pernet, D., Gaudillère, J.-P., 2009. Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? *International journal of vine and wine sciences* 43, 121-134.
- Villa, G., Moreno, J., Calera, A., Amorós-López, J., Camps-Valls, G., Domenech, E., Garrido, J., González-Matesanz, J., Gómez-Chova, L., Martínez, J.Á., Molina, S., Peces, J.J., Plaza, N., Porcuna, A., Tejeiro, J.A., Valcárcel, N., 2012. Spectro-temporal reflectance surfaces: a new conceptual framework for the integration of remote-sensing data from multiple different sensors. *International Journal of Remote Sensing* 34, 3699-3715.
- Williams, L.E., Ayars, J.E., 2005. Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* 132, 201-211.
- Wright, J.L., 1982. New Evapotranspiration Crop Coefficients. *Journal of the Irrigation and Drainage Division* 108, 57-74.





