

**CONAMA 2022**

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

# Contabilidad hídrica de modernizaciones de riego

Estudios de caso y aplicación a escala  
de subcuenca



**Autor Principal:** Sara Ros Cardoso (ICATALIST)

**Otros autores:** Alberto Fernández Lop (WWF); Manuel Bea Martínez (ICATALIST)

# ÍNDICE

<b>1. Título</b>	<b>3</b>
<b>2. Agradecimientos</b>	<b>3</b>
<b>3. Resumen</b>	<b>3</b>
<b>4. Introducción</b>	<b>4</b>
4.1 Antecedentes	4
4.2 Objetivo	5
<b>5. Metodología</b>	<b>6</b>
5.1 Balance de agua en el regadío	6
5.2 Modelo de contabilidad hídrica	7
5.2.1. Cálculo de los componentes del modelo de contabilidad hídrica	10
5.3 Estimación de la evapotranspiración real de los cultivos	11
5.4 Balance del cambio de recursos hídricos disponibles para la cuenca tras las modernizaciones de regadío	13
<b>6. Descripción de las zonas de estudio</b>	<b>15</b>
6.1 Almudévar (Huesca)	16
6.2 Florida de Liébana (Salamanca)	18
6.3 Zona regable de Peñarroya (Ciudad Real)	19
6.4 Zonas regables del Páramo de León (León)	21
<b>7. Resultados</b>	<b>23</b>
<b>8. Conclusiones</b>	<b>26</b>
<b>9. Bibliografía</b>	<b>27</b>

## 1. TÍTULO

Contabilidad hídrica de modernizaciones de regadío: estudios de caso y aplicación a escala de subcuenca.

## 2. AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a todas las personas que han ayudado en este proyecto, a todos aquellos que se han esforzado para que este estudio siga adelante y al equipo de WWF, I-catalist y colaboradores.

## 3. RESUMEN

Este estudio, realizado en 2020 y 2021 por I-CATALIST y WWF, contribuye a establecer un diagnóstico de los cambios en la disponibilidad de recursos hídricos para diferentes zonas de estudio (la región del Páramo de León, Florida de Liébana, Peñarroya y Almodévar) como consecuencia de la ejecución de proyectos de modernización de regadíos.

La metodología de análisis se ha basado en un modelo para el cálculo de balances hídricos antes y después de los procesos de modernización de regadío, apoyado por procesos de teledetección para estimar superficies de riego y consumo por evapotranspiración de los cultivos.

Los resultados demuestran que, con las modernizaciones, hay una reducción del volumen de agua suministrado a nivel de parcela de entre el 7% y el 36%. Sin embargo, a nivel de cuenca se observa un mayor consumo de agua (evapotranspirada) y una disminución muy notable en el retorno del agua, en comparación con las técnicas tradicionales de riego por gravedad. Esto se debe al incremento de la superficie regada y/o a una mayor productividad por hectárea regada.

Estos resultados ponen de manifiesto que la modernización del regadío no constituye necesariamente una medida para la consecución de la mejora del estado de las masas de agua, sino que, por el contrario, puede suponer un incremento de consumo y una reducción del agua disponible para otros usos en la cuenca (incluyendo el uso ambiental) que debe evaluarse de cara al cumplimiento de los objetivos de planificación hidrológica.

## 4. INTRODUCCIÓN

### 4.1 Antecedentes

En 2015, WWF publicó el informe *“Modernización de Regadíos - Un mal negocio para la naturaleza y la sociedad”*, en el que se presentan una serie de lecciones aprendidas de la modernización de regadíos en España y se establece un conjunto de propuestas relacionadas con la planificación hidrológica, la mejora de la gobernanza, el diseño y ejecución, y el control y monitorización de los planes y proyectos de regadío. Este informe se basa en un estudio previo realizado por WWF en 2014 en colaboración con investigadores de la universidad de Zaragoza, en el que se analiza la variación en el consumo de agua como consecuencia de 10 modernizaciones de comunidades de regantes sobre las que existían estudios previos.

A pesar de que el informe de WWF utiliza de forma general un marco metodológico de contabilidad hídrica basado en conceptos ampliamente aceptados por la comunidad científica (ver Batchelor et al, 2017), recibió contestaciones directas por parte del sector del regadío y de varios grupos de investigación ligados con temáticas relacionadas con el uso del agua en agricultura (ver *“Modernización de regadíos: un éxito para la naturaleza y la sociedad”*).

Este tipo de discusiones en relación a la evaluación del ahorro de agua ligado a la modernización de regadíos no resulta exclusiva de España, sino que se extiende prácticamente a todos los países afectados por situaciones de escasez hídrica y en los que la agricultura de regadío tiene un desarrollo importante. En 2017, la FAO (Food and Agriculture Organisation of United Nations) publicó un informe denominado *“Does improved irrigation technology save water? A review of the evidence”*, que ahonda en esta cuestión (FAO, 2017).

La principal conclusión de este estudio es que *“generalmente se asume que el incremento en la eficiencia en el riego conlleva ahorros de agua sustanciales, permitiendo que el agua ahorrada pueda destinarse a otros usos, como por ejemplo el uso medioambiental. Sin embargo, las evidencias proporcionadas por la investigación y las mediciones en campo muestran que esta presunción no es cierta. El beneficio a escala de parcela de riego es muy importante, pero cuando se realiza una contabilidad hídrica a nivel de cuenca, se observa que el total de agua consumida por el regadío tiende a aumentar en lugar de disminuir”*.

Para la elaboración de este estudio se recopiló información de casos de estudio provenientes de 14 países diferentes (incluyendo España), en general utilizando varios casos de estudio por país. El criterio de inclusión de casos en el estudio es la disponibilidad de datos relacionados con el consumo de agua y/o la productividad agrícola en términos de producción por volumen de agua consumido. Los autores resaltan que no se ha aplicado ningún tipo de filtro en el proceso de recopilación de casos de estudio con objeto de favorecer las conclusiones obtenidas. Los autores concluyen, a partir de toda la evidencia existente, que la suposición de que el aumento de la eficiencia en el riego ahorra agua e incrementa la productividad del agua se ha extendido debido a una confusión generalizada entre la escala utilizada en la contabilidad (los ahorros obtenidos en la parcela de riego no deben confundirse con la contabilidad a escala de cuenca), y el hecho de que la productividad a menudo se calcula en términos de agua utilizada y no en términos de agua consumida. En general, la evidencia muestra que el aumento de eficiencia en el riego produce:

- Un aumento en el consumo de agua, debido al incremento de la superficie regada y/o a una mayor cosecha por hectárea regada;

- Un cambio poco significativo en la productividad biofísica del agua ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) y;
- Un aumento de la productividad económica del agua ( $\text{€}/\text{m}^3$ ).

Los casos de estudio incluidos en el informe, muestran de forma general, incrementos en el consumo de agua como un efecto de las modernizaciones. Para el caso de España se recopilieron cuatro estudios diferentes. En tres de estos estudios, se muestra un aumento del consumo frente a una reducción del uso, mientras que para el estudio de (Berbel, 2015) se concluye que resulta difícil poder interpretar los resultados de una forma que no resulte ambigua (*“The data do show that the total water supply in the pre-modernization scenario was 98 percent of potential crop demand, falling to 90 percent postmodernization. Whether this difference is real water saving is unclear”*).

Como otro punto adicional a considerar en estos antecedentes, cabe destacar la falta, con carácter general, del enfoque de cuenca en los estudios disponibles. Únicamente se ha encontrado un trabajo, para la cuenca del Ebro (Lecina, 2009), en el que se realiza una evaluación global del déficit previsto por el Plan de Choque de modernización de regadíos para la cuenca. Según este estudio, el cálculo del aumento de la fracción consuntiva productiva (evapotranspiración) es equivalente al balance de cuenca que se obtiene al comparar la disminución del volumen suministrado a las zonas regables modernizadas con la reducción de retornos utilizables para otros usos. Es importante proponer una metodología que permita estimar los cambios en consumos y retornos para evaluar el impacto del aumento de la tecnificación del regadío sobre las cuencas hidrográficas.

## 4.2 Objetivo

Ante estos antecedentes, el objetivo principal del presente estudio es **analizar los cambios en uso de recursos hídricos de varias modernizaciones de regadío en diferentes territorios, comparando la situación de antes y después, utilizando una metodología de contabilidad hídrica** desarrollada con objeto de determinar la variación del consumo por evapotranspiración de los cultivos y el balance de agua disponible para otros usos a escala de cuenca en las distintas áreas de estudio.

Dado que el consumo por evapotranspiración resulta el principal componente del balance hídrico en las zonas regables, se va a demostrar la ventaja de aplicar una metodología basada en la integración de series temporales de imágenes de satélite con modelos de cultivo, para poder estimar esta variable con mayor fiabilidad cuando las fuentes de datos no existan o sean de baja calidad.

Como último objetivo está el desarrollo de una **hoja de cálculo** que facilite y automatice la aplicación de los procesos de contabilidad hídrica sobre las modernizaciones de regadío.

## 5. METODOLOGÍA

En el presente trabajo, utilizamos el **marco metodológico de fracciones de uso de agua** definido por (Burt et al, 1997). En concreto, nos basamos en una adaptación en un marco de contabilidad hídrica descrito por (Grafton et al, 2018) en un estudio publicado en la revista Science (*"The paradox of irrigation efficiency"*).

En los casos de estudio, el análisis de contabilidad hídrica se centra en los balances hídricos antes y después de los procesos de modernización, utilizando técnicas de teledetección para la estimación de los consumos de agua por parte de los cultivos en regadío. Para ello, se han tenido en cuenta un número limitado de años y utilizando una aproximación metodológica que admite mejoras mediante una modelización más detallada.

Esta metodología se aplicó en los casos de estudio representando modernizaciones de regadío con características muy diferenciadas, correspondientes a las comunidades de regantes (CCRR) de Almodívar (Huesca, demarcación hidrográfica del Ebro), de Florida de Liébana (Salamanca, demarcación hidrográfica del Duero), del embalse de Peñarroya (Ciudad Real, demarcación hidrográfica del Guadiana) y del Páramo de León (León, Demarcación Hidrográfica del Duero).

### 5.1 Balance de agua en el regadío

Los **balances hídricos** consisten en cuantificar y sumar los flujos de entrada y salida de la cuenca, así como aquéllos de consumo y retorno que ocurren en el sistema siguiendo la ley de conservación de masas (Figura 1). En este estudio, los sistemas considerados son cada una de las subcuencas estudiadas para las cuales se han definido las entradas y salidas a tener en cuenta.

**Las entradas quedan limitadas al volumen de agua suministrado para el riego de los cultivos** (zona regable), el cual se corresponde al volumen de USO del agua. Cuando se reducen las aportaciones de agua a la zona regable como consecuencia de la mayor eficiencia de los sistemas de riego (en términos de almacenamiento, distribución y aplicación) se producirá una disminución de uso. Es importante indicar que una reducción de uso no es equivalente a un ahorro de agua, ya que el ahorro de agua solo se puede determinar como resultado del balance completo de volúmenes de entrada y salida, y no fijándonos únicamente en como una disminución del volumen suministrado.

Los **volúmenes de salida** se agrupan en CONSUMO y RETORNOS. La suma de los consumos y retornos debe ser igual al volumen suministrado, no contabilizándose otras entradas de agua al sistema de riego, como la precipitación.

- El consumo se divide en consumo beneficioso o productivo, que corresponde a la evapotranspiración de los cultivos, y consumo no beneficioso o no productivo, que corresponde con las salidas de agua hacia la atmósfera diferentes de la evapotranspiración de los cultivos regados, como por ejemplo la evaporación desde canales o láminas de agua, las pérdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersión, o la evaporación de agua consumida por plantas adventicias.
- Los retornos pueden producirse por escorrentía superficial o de forma más lenta, por percolación profunda. Se dividen en retornos recuperables y retornos no recuperables.

Dentro de este balance, se considera un volumen de suministro al sistema que debido a la ley de conservación de masas debe igualarse a la suma de consumos (evaporación, evapotranspiración, infiltración no recuperable) y retornos utilizables.

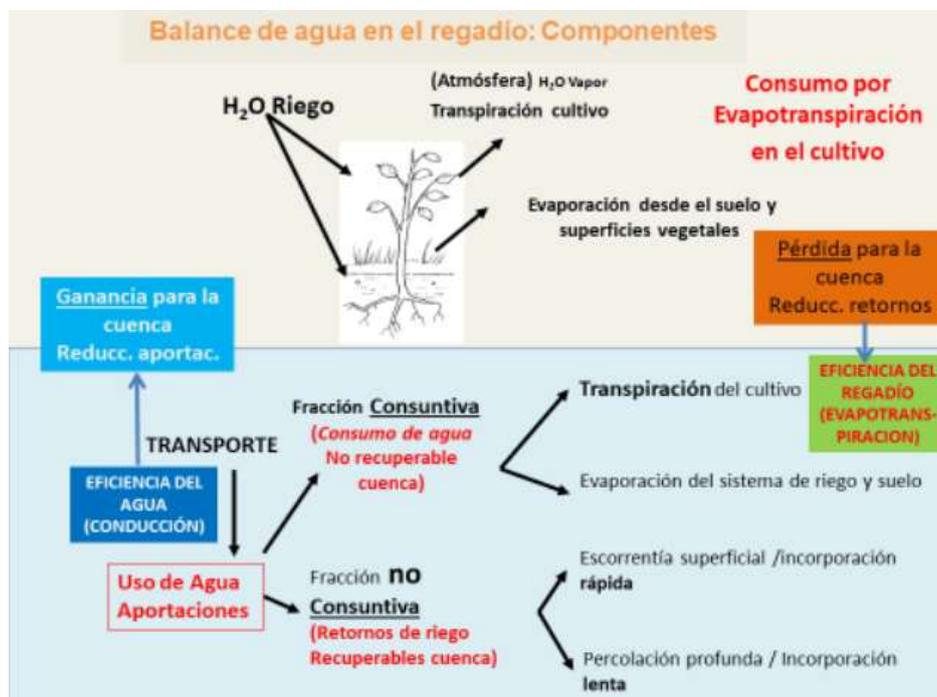


Figura 1. Descripción del balance de conservación de masas del agua de riego

## 5.2 Modelo de contabilidad hídrica

Para analizar el uso/consumo del agua antes y después de un proceso de modernizaciones de regadío se ha elaborado una metodología que establece un balance hídrico considerando las **fracciones de uso de agua para distintos sistemas de riego** (cuadro 1).

Cuadro 1. Valores medios de la fracciones de uso/consumo de agua para distintos tipos de sistemas de riego (datos tomados de Grafton et al, 2018)

	Por gravedad	Por aspersión	Por goteo
<b>fe</b>	10 - 25 %	10 - 30 %	5 - 15 %
<b>ft</b>	40 - 70 %	65 - 85 %	85 - 95 %
<b>finf + fesc</b>	15 - 50 %	5 - 15 %	0 - 10 %
<b>Consumo</b>	50 - 85 %	85 - 95 %	90 - 100 %
<b>Retornos</b>	15 - 50 %	5 - 15 %	0 - 10 %

Fuente: Grafton et al, 2018

Donde:

- **ft**: fracción evapotranspirada por los cultivos.
- **fe**: fracción evaporada (durante almacenamiento, distribución y aplicación) y evapotranspirada por vegetación diferente de los cultivos.

- **finf:** fracción infiltrada (durante distribución y aplicación). Una parte de esta fracción podría considerarse como “no recuperable” debido su concentración en sales o contaminantes o porque no puede ser aplicada a otros usos (por ejemplo, si los retornos van directamente al mar). Es decir, finf se divide en finf-rec (fracción infiltrada recuperable) y finf-norec (fracción infiltrada no recuperable).
- **fesc:** fracción de escorrentía (durante distribución y aplicación).
- La suma de  $f_t + f_e + finf + fesc$  es igual a 100%, y en términos de volumen es igual al suministro de agua recibido en la zona de riego.
- La suma de  $f_t + f_e + finf-norec$  nos indica el porcentaje de consumo o porcentaje no reutilizable. La suma de  $finf-rec + fesc$  proporciona el porcentaje de retorno o porcentaje reutilizable

Además, en el análisis se analiza por separado la división del volumen de suministro en las fracciones de uso para los tres componentes principales del sistema de riego: **almacenamiento**, transporte y **distribución**, y **aplicación**.

Por otro lado, la eficiencia global de los sistemas de riego se ha estimado teniendo en cuenta:

- La longitud y estado de conservación de los canales de riego
- El tamaño de las balsas de almacenamiento
- Las condiciones climáticas (velocidad media del viento y humedad relativa) y características del suelo.

**Cuadro 2.** Eficiencia estimada de los sistemas de riego

Sistema de riego	Eficiencia estimada	Rangos esperables (según ITACYL)
Aspersión	0,83	0,65-0,90
Gravedad	0,58	<0,6

Fuente: ICATALIST

Finalmente, la metodología de análisis se aplica a través de un modelo de contabilidad hídrica (ver figura 2) en el que se aplican varios procesos para la estimación de las fracciones de uso en cada fase de riego a partir de variables agronómicas (superficies de cultivos regados, dotaciones), de las características del sistema de riego, de datos agro-climáticos y de datos edafológicos.



### 5.2.1. Cálculo de los componentes del modelo de contabilidad hídrica

La fracción con mayor peso en el análisis es la **fracción evapotranspirada**, dado que la mayor parte del volumen suministrado al esquema de riego acaba siendo utilizado por los cultivos regados y evaporado desde las capas superficiales del suelo o transpirado desde los estomas de la vegetación después de transportar las sales formando la savia bruta, “refrigerar” las planta y facilitar así su desarrollo y actividad fotosintética. Los datos fundamentales para estimar esta fracción para el conjunto del regadío son la extensión de los distintos tipos de cultivos en regadío y la evapotranspiración real (ETc) de los cultivos en riego. En ambos casos, no resulta sencillo encontrar datos de calidad que permitan estimar con fiabilidad la fracción evapotranspirada. Por un lado, los datos relativos a la extensión de los cultivos regados están sujetos a un grado significativo de incertidumbre, principalmente antes de los procesos de modernización, ya que estos datos no se recogían de forma sistemática o están sujetos a diversos sesgos. Por otro lado, los datos relacionados con la evapotranspiración en los proyectos o estudios son a menudo estimaciones de la evapotranspiración potencial o necesidades teóricas de riego de los cultivos, pero no de evapotranspiración real. No se debe confundir con el término “dosis de riego” o “dotación de riego”, que corresponde al suministro en parcela.

Ante esta situación, también se ha aplicado a los casos de estudio una metodología basada en la integración de técnicas de teledetección y modelos de crecimiento de cultivos para obtener una estimación fiable de la fracción media evapotranspirada antes y después de los procesos de modernización.

La **fracción evaporada** se debe a procesos diferentes antes y después de la modernización.

Antes de los procesos de modernización, se debe principalmente a la suma de la evaporación desde los canales abiertos y sistemas de acequias utilizados para el transporte y distribución del agua de riego y a la evaporación desde la lámina de agua aplicada en el riego por inundación. Al no ser una fracción tan importante en volumen, se han utilizado coeficientes genéricos descritos por FAO en varias de sus guías.

Después de la modernización, los procesos de evaporación se producen principalmente durante el almacenamiento en las balsas de riego y la aplicación del riego por aspersión. Para la estimación de las salidas a la atmósfera por evaporación en balsas de almacenamiento, se ha medido la superficie ocupada por las balsas a partir de ortofotografía aérea y se ha aplicado un método basado en el uso del coeficiente de tanque  $K_p$  y el dato de  $ET_0$  (ver Martínez-Granados, 2015 y Martínez-Alvárez et al, 2007). Para la estimación de las salidas a la atmósfera por evaporación relacionadas con la aplicación mediante sistemas de aspersión (salidas a la atmósfera por evaporación y arrastre) se ha utilizado la fórmula aplicada por (Jiménez Aguirre, 2017) y que se construye a través de dato de velocidad media del viento y humedad relativa. Con carácter adicional, se ha considerado el porcentaje de riego diurno/nocturno ya que este es un factor con una incidencia significativa sobre esta variable.

La **fracción infiltrada** se estima a partir de un modelo sencillo de balance hídrico en el suelo, que considera dosis y frecuencias medias de riego para cada tipo de sistema de aplicación (p.e. dosis de riego suministrada mucho más altas en un riego por inundación que en un riego modernizado, pero mucho más espaciadas en el tiempo), valores medios de coeficiente de homogeneidad de riego para los distintos sistemas, y valores medios de profundidad de raíces de los distintos cultivos. Además, se apoya en una estimación del agua total en la zona de raíces, (TAW - Total Available Water), del agua fácilmente disponible para las plantas (RAW – Readily Available Water) y de la velocidad de infiltración, que se realiza en base a la

distribución textural media de los suelos. Hay que incidir en el hecho de que utilizamos un modelo sencillo que usa datos medios y estimaciones pero que resulta suficiente para obtener resultados en un orden de magnitud aceptable en el ámbito de la cuenca hidrográfica.

La componente de infiltración es minoritaria dentro el balance global (sobre todo después de la modernización) por lo que esta aproximación se considera suficiente dada la gran complejidad de obtener datos precisos para todas las variables necesarias. Los porcentajes de agua infiltrada recuperable y no recuperable deben evaluarse caso a caso. De la misma forma, el porcentaje de agua infiltrada que se incorpora a un ciclo de aguas subterráneas o vuelve al sistema de aguas superficiales en un plazo de tiempo relativamente corto depende de las características propias de cada zona regable modernizada (p.e. en zonas aluviales en las llanuras de inundación la práctica totalidad del agua infiltrada se considerará un retorno recuperable para el río).

Por último, la **fracción de escorrentía** se considera despreciable para los riegos tecnificados, mientras que para los riegos por inundación se asume que forma parte de los retornos de riego, generalmente a partir del sistema de drenajes.

### 5.3 Estimación de la evapotranspiración real de los cultivos

La evapotranspiración “real” de los cultivos o demanda evaporativa o consumo (ET<sub>c</sub>) depende principalmente de las condiciones meteorológicas (que definen la capacidad de evapotranspiración máxima de referencia o ET<sub>0</sub>) y del estado de desarrollo fenológico de los cultivos (que condiciona la capacidad de evapotranspiración de las hojas de cada planta. Por ello la ET<sub>0</sub> se corrige mediante un coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>) para calcular la ET<sub>c</sub>, según la siguiente ecuación:

$$[ET_c = ET_0 \times K_c]$$

El coeficiente K<sub>c</sub> generalmente se toma de tablas genéricas para cada tipo de cultivo. La FAO estableció los valores teóricos de K<sub>c</sub> para muchos cultivos herbáceos, pero la literatura que pueda facilitar estos datos es muy escasa y afecta a pocos cultivos. A su vez, el coeficiente de cultivo K<sub>c</sub> se suele dividir en dos componentes, denominados K<sub>c<sub>b</sub></sub> (coeficiente basal de cultivo) y K<sub>s</sub> (coeficiente de suelo). En muchos estudios, se incluye además un coeficiente adicional de estrés hídrico (por ejemplo cuando se utilizan técnicas de riego deficitario o bien existe escasez de recursos hídricos).

Para los casos de estudio presentados en este informe, sin embargo, se han utilizado **técnicas de teledetección para el cálculo de la evapotranspiración**, ya que se han mostrado como una alternativa práctica (en término de tiempo y costes) para estimar la ET<sub>c</sub> de los cultivos regados a escala regional, teniendo en cuenta su distribución espacial y la variabilidad en su desarrollo.

En la literatura científica se identifican dos grupos principales de aproximaciones metodológicas para el uso de datos de teledetección en la estimación de la evapotranspiración de los cultivos (D’Urso, 2010; Calera et al, 2017):

- La estimación del coeficiente basal de cultivo (K<sub>c<sub>b</sub></sub>) a partir de series temporales de Índices de Vegetación
- El uso de métodos de estimación del balance de energía en superficie, o el cálculo de los componentes de la ecuación de Penman Monteith, usando teledetección como apoyo.

En este estudio se ha optado por la primera opción, aplicando la metodología de estimación de la evolución del coeficiente basal de cultivo ( $K_{c,b}$ ) a lo largo de la campaña de riego, mediante el cálculo de su correlación con series temporales de NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) calculadas a partir de imágenes tomadas por los satélites Landsat y Sentinel 2.

Para ello, nos hemos basado en la metodología de uso extendido descrita en (Allen et al, 1998) y en menor medida en (Doorenbos y Pruitt, 1977; Doorenbos et al, 1999; y Steduto et al, 2012). Además, esta metodología se beneficia de la disponibilidad de mapas de cultivos regados, principalmente si estos mapas cuentan con un alto nivel de detalle.

En concreto, la metodología más extendida se centra en la estimación de los coeficientes de cultivo basándose en la reflectancia espectral de los índices de vegetación, siendo el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) el de uso más extendido. El NDVI tiene en cuenta la reflectancia de las longitudes de onda roja e infrarroja cercanas:

- La radiación espectral del **rojo** es fuertemente absorbida por la clorofila en las hojas de las capas superiores,
- mientras que la radiación del **infrarrojo cercano** es reflejada por la estructura del mesófilo de las hojas.

Por tanto, los valores del NDVI son más elevados cuanto mayor es la densidad y actividad fotosintética de la vegetación y por ello representan un mayor potencial evaporativo.

Numerosos estudios han probado la existencia de una fuerte correlación entre las series temporales de índices de vegetación para los cultivos regados y la evolución de los valores de  $K_c$  de estos cultivos a lo largo de la campaña de riego. Diferentes aspectos de la relación entre índices de vegetación y el coeficiente de cultivo, así como relacionados con el cálculo de la evapotranspiración de los cultivos a lo largo de la campaña de riego, son explicados en detalle en la literatura científica (Bausch et al, 1987; Bausch et al, 1993; D'Urso, 2001; González-Dugo et al, 2008; Rafn et al, 2008; González-Dugo et al, 2009; Martínez-Beltrán et al, 2009; Campos et al, 2010; Gontia y Tiwari, 2010; Torres y Calera, 2010; Delegido et al, 2011; Glenn et al, 2011; Farg et al, 2012; Johnson y Trout, 2012; Rocha et al, 2012; Sánchez et al, 2012; Mateos et al, 2013; Pôças et al, 2015; Reyes-González et al, 2015; Vanino et al, 2015; Vuolo et al, 2015; Adamala et al, 2016; Campos et al, 2016; Parmar y Gontia, 2016; Reyes-González et al, 2016; Tello et al, 2017; Reyes-González et al, 2018).

La aplicación de la metodología se ha llevado a cabo en los siguientes pasos para cada una de las zonas regables y años considerados dentro del estudio:

- Discriminación espectral y elaboración de una **cartografía de los cultivos en regadío** utilizando como base cartográfica los recintos de las parcelas catastrales (escala 1:5.000) e identificando los principales tipos de cultivos herbáceos (de primavera, verano, otoño e invierno, diferenciando maíz y alfalfa) y leñosos a partir del proceso digital de imágenes de satélite de alta resolución (Landsat y Sentinel 2) y su integración con datos espaciales y cartográficos. La recopilación de datos se ha completado con ortofotografía aérea suministrada por el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA).
- **Cálculo de los valores medios de NDVI** para cada parcela en riego y para cada una de las imágenes de satélite disponibles. Interpolación de los valores de NDVI para obtener valores diarios de NDVI.

- Desarrollo de un modelo de regresión lineal simple entre los valores de NDVI y los valores tabulados de  $K_{cb}$ , teniendo en cuenta modelos de cultivo para estimar **valores del coeficiente  $K_s$**  y prácticas agronómicas de riego para cada cultivo.
- Estimación de los **valores agregados de ETC**, a partir de la multiplicación de los valores de ETO medidos en estaciones agroclimáticas cercanas por la curva de los valores estimados de  $K_c$  mediante teledetección para cada fecha.

## 5.4 Balance del cambio de recursos hídricos disponibles para la cuenca tras las modernizaciones de regadío

Para cada proceso de modernización analizado, se han realizado dos balances con objeto de evaluar la situación media antes y después de cada modernización.

Estos balances cumplen la condición de la conservación de volúmenes de agua, de forma que:

$$V_s = V_t + V_e + V_{inf-rec} + V_{inf-norec} + V_{esc} \quad (Ec.1)$$

donde:  $V_s$ : es el volumen suministrado

$V_t$ : es el volumen evapotranspirado desde los cultivos regados

$V_e$ : es el volumen evaporado que no ha sido usada por los cultivos

$V_{inf-rec}$ : es el volumen infiltrado recuperable

$V_{inf-norec}$ : es el volumen infiltrado no recuperable

$V_{esc}$ : es el volumen de escorrentía

Sobre esta ecuación, vamos a añadir los subíndices 'a' (antes) y 'd' (después) sobre cada uno de los términos, para diferenciar los dos balances calculados.

Además, vamos a definir la diferencia entre los términos de los balances antes y después, de forma que por ejemplo, la **diferencia entre el volumen medio suministrado** a la zona regable antes y después de la modernización se define como:

$$Dif (V_s) = V_{s_d} - V_{s_a} \quad (Ec. 2)$$

Y sustituyendo los valores de  $V_{s_d}$  y  $V_{s_a}$  por los correspondientes a la ecuación 1, obtenemos:

$$Dif (V_s) = V_{t_d} + V_{e_d} + V_{inf-rec_d} + V_{inf-norec_d} + V_{esc_d} - (V_{t_a} + V_{e_a} + V_{inf-rec_a} + V_{inf-norec_a} + V_{esc_a}) \quad (Ec. 3)$$

Por otro lado, podemos definir **el consumo** como la suma de las tres fracciones consuntivas:

$$Consumo = V_t + V_e + V_{inf-norec} \quad (Ec. 4)$$

Mientras que **los retornos** corresponden a la suma de la fracción infiltrada recuperable y la escorrentía, siempre que consideremos que la fracción de escorrentía no recuperable para el sistema hídrico no es significativa. De esta forma asumimos que:

$$Retornos = V_{inf-rec} + V_{esc} \quad (Ec. 5)$$

Mediante la combinación de las ecuaciones 3, 4 y 5, obtenemos que

$$Dif (V_s) = Dif (consumo) + Dif (retornos) \quad (Ec. 6)$$

En el caso concreto de las modernizaciones, la diferencia de consumo tiende a ser positiva debido al aumento de productividad agrícola ligado a estos procesos, mientras que la

diferencia de retornos tiende a ser negativa, debido al aumento de eficiencia en el uso agronómico del agua ligado a la tecnificación de los sistemas de riego. Esto supone la aparición de un déficit hídrico para las cuencas, o lo que es lo mismo, una reducción de los recursos para la cuenca que suponían los retornos antes de la modernización.

En este punto, hay que introducir la idea del **balance de agua disponible para la cuenca**, que se define como la diferencia en el volumen de recursos hídricos que pueden ser utilizados para otros usos (incluyendo el uso ambiental) en otras partes de la cuenca (generalmente, aguas debajo de la zona regable). Para el cálculo de este balance, no se consideran los volúmenes consumidos, ya que se trata de agua evaporada o que no puede ser utilizada por otros usuarios (en el caso de finf-norec). De esta forma, el balance para la cuenca ('Balance de cuenca') se puede expresar en términos de déficit o ahorro al comparar las posibles medidas de gobernanza del agua (propuestas por el proyecto o decididas por la administración) tras la modernización (reducción de suministros) y se define como:

$$\text{Balance de cuenca} = \text{Dif (Vs)} - \text{Dif (retornos)} \quad (\text{Ec. 7})$$

Esta será la ecuación que aplicaremos sobre los balances elaborados para cada caso de estudio. Los valores positivos de la ecuación corresponden a situaciones en las que el proyecto produce ahorro para las cuencas y los negativos suponen un nuevo déficit de disponibilidad de agua para la cuenca hidrográfica en relación con la situación previa a la modernización.

Por último hay que indicar que de la combinación de las ecuaciones 6 y 7, obtenemos que **el balance de cuenca es equivalente a la diferencia de consumos**:

$$\text{Balance\_cuenca} = V_{t_d} + V_{e_d} + V_{\text{inf-norec}_d} - (V_{t_a} + V_{e_a} + V_{\text{inf-norec}_a}) \quad (\text{Ec. 8})$$

Si los datos de consumo suministrados por el proyecto (u otro origen) están disponibles nos permite tener una estimación aproximada del déficit de cuenca que produce cada proyecto de modernización.

Para muchos procesos de modernización podemos asumir que la fracción infiltrada no recuperable es muy poco significativa, por lo que podemos considerar el volumen infiltrado no recuperable como despreciable. Esto es particularmente cierto después de los procesos de modernización.

Por otro lado, parece que en muchos casos, los volúmenes evaporados no beneficiosos antes y después de la modernización, tienden a ser del mismo orden de magnitud, sobre todo cuando después de la modernización el riego se aplica principalmente mediante aspersión. Teniendo esto en cuenta, se puede realizar una simplificación para realizar una aproximación rápida para una estimación inicial del balance de cuenca bajo la asunción de que:

$$\text{Balance\_cuenca} \approx \text{Dif (Vt)} \quad (\text{Ec.9})$$

De forma que para una gran parte de los procesos de modernización de riego, el balance de cuenca tiende a asemejarse a la diferencia en el volumen evapotranspirado por los cultivos en riego (ver figura 3).

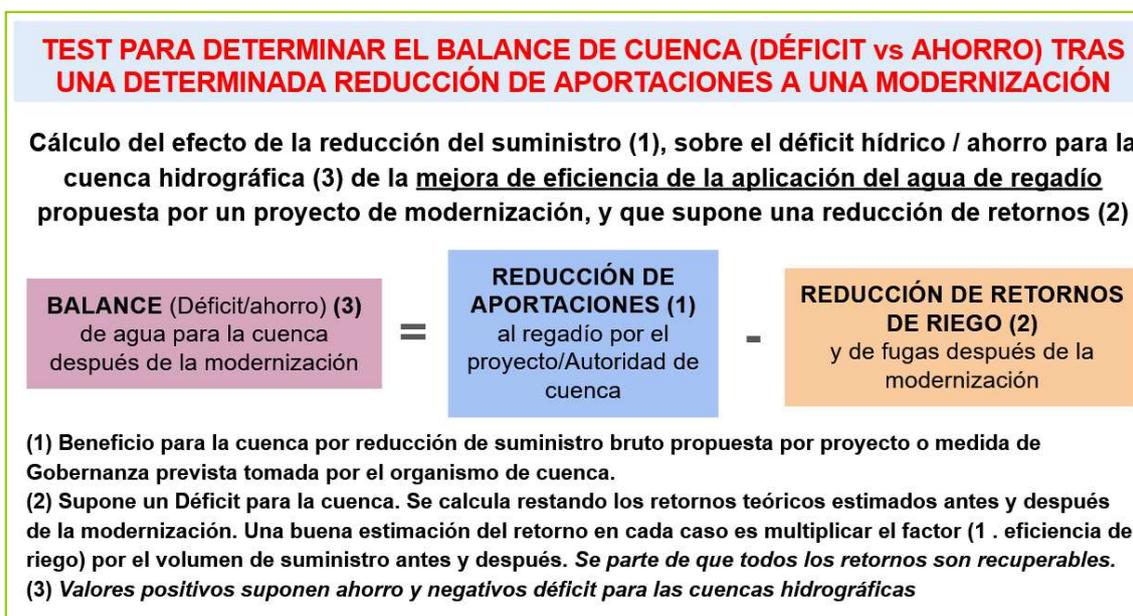


Figura 3. Test para la determinación del balance de cuenca (déficit vs ahorro) tras una determinada propuesta de reducción de aportes a una modernización (ICATALIST)

Para la sistematización de la obtención de información y la realización de los cálculos se ha programado una hoja Excel y se ha diseñado un formato para la introducción de los datos y para la visualización de los resultados finales mediante gráficos comparativos y textos explicativos.

## 6. DESCRIPCIÓN DE LAS ZONAS DE ESTUDIO

En el presente trabajo se pueden diferenciar dos estudios, en primero se llevaron a cabo tres casos de estudio con el objetivo inicial de validar la metodología y la hoja de cálculo, y con el objeto principal de evaluar los cambios en el balance de cuenca como consecuencia de proyectos de modernización; y en el segundo, se realizó el estudio de un conjunto mucho más amplio de modernizaciones en una misma zona (Páramo de León). Estos casos corresponden a las comunidades de regantes (CCRR) de Almudévar (Huesca, demarcación hidrográfica del Ebro), de Florida de Liébana (Salamanca, demarcación hidrográfica del Duero) y del embalse de Peñarroya (Ciudad Real, demarcación hidrográfica del Guadiana).

Como criterio principal para la identificación de los casos de estudio se ha tenido en cuenta la disponibilidad de datos y la existencia de otros estudios y trabajos. Además, se ha buscado que exista una complementariedad entre los casos de estudio que permita cubrir diferentes tipos de modernizaciones. Esta información se resume en el cuadro 2.

Cuadro 3. Resumen de las principales características de las modernizaciones seleccionadas

	Almudévar	Florida de Liébana	Peñarroya	Páramo de León
Superficie aproximada de la zona regable (ha)	4.130	1.225	7.700	66.316

	Almudévar	Florida de Liébana	Peñarroya	Páramo de León
Área regada anualmente antes (ha)	3.150	1.150	4.700	x
Área regada anualmente después (ha)	4.425	1.300	5.000	49.483
Nivel de tecnificación previo	Riego no tecnificado por inundación	50% del riego mediante aspersión	100% del riego ya tecnificado	72% del riego ya tecnificado
Punto de toma	Canal de Monegros (abastece a otras ZR)	Río Tormes (canal específico para la ZR)	Embalse de Peñarroya	Embalse de Selga de Ordás (abastece ZR Páramo-Páramo Medio, Velilla y Villadangos) y Río Esla (ZR Páramo Bajo).
Punto de retorno	Arroyo de la Violada (diferente de la toma)	Río Tormes (punto de toma)	Aguas subterráneas (acuífero Mancha Occ.)	Río Órbigo y acuífero Raña del Órbigo
Cultivos principales	Maíz	Maíz	Viñedo	Maíz
Otros cultivos	Cereales de invierno y alfalfa	Remolacha, alfalfa y cereal	Pimiento, tomate, cebolla, alfalfa, maíz, cereal y ajo	Cereales de invierno, remolacha y hortalizas
Cambios en los cultivos	Aparición de dobles cosechas	Sin cambios	Sin cambios	x

Fuente: ICATALIST

## 6.1 Almudévar (Huesca)

La Comunidad de Regantes de Almudévar (C.R. Almudévar) fue constituida en 1957, perteneciendo a la Comunidad General de Riegos del Alto Aragón, en la cuenca del río Ebro. La zona regable de Almudévar ocupa en torno a 4.130 hectáreas de regadío dentro de los términos municipales de Almudévar y Gurrea de Gállego (provincia de Huesca).

En el caso de la C.R. de Almudévar, la **práctica totalidad del riego antes de la modernización se producía por inundación** con un sistema de riego que presentaba ciertas limitaciones para el riego de cultivos herbáceos regados durante el verano con altas dotaciones. Como paso previo

al proceso de modernización se produjo además una concentración parcelaria aumentando de forma significativa el tamaño medio de las parcelas regadas. La zona regable se asienta sobre un subsuelo arcilloso y muy poco permeables, por lo que la percolación profunda del agua de riego es prácticamente despreciable.

La mayor parte de los retornos de riego se derivan a través del arroyo de La Violada, que recorre el centro de la zona regable, y para el que existe una estación de aforo justo aguas debajo de su salida de la zona regable. Este hecho permite una estimación de los retornos de riego mucho más fiable del que se dispone para otras zonas regables. Por este motivo, esta zona resulta óptima para poder terminar de definir la metodología de contabilidad hídrica por fracciones. Quizás por ello, en esta zona se han realizado varios estudios científicos relacionados con varios aspectos ligados a la modernización de regadíos, lo que asegura una disponibilidad óptima de datos. Los cultivos principales son los cereales de invierno, el maíz y la alfalfa, produciéndose en la actualidad dobles siembras en muchas de las parcelas, lo que no sucedía antes de la modernización.

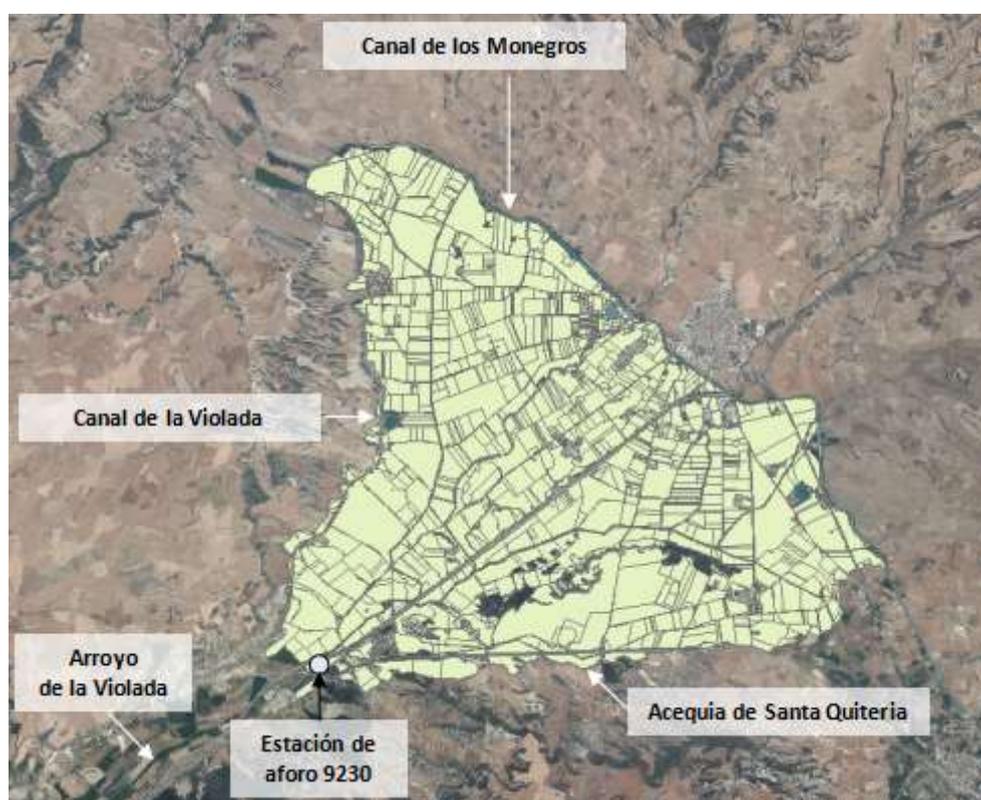


Figura 4. Localización de la zona regable de Almudévar y de las acequias principales de riego

El **proceso de modernización se llevó a cabo en los años 2008 y 2009**, si bien en los años anteriores se comenzaron a ejecutar algunas actuaciones previas. De forma tradicional, los cultivos se regaban mediante riego por gravedad, a través de un sistema de acequias alimentado mediante tomas desde el propio canal de los Monegros y desde dos acequias principales (canal de la Violada y acequia de Santa Quiteria). El sistema de distribución del agua fue diseñado para el riego de cereales de invierno, por lo que presentaba una capacidad insuficiente de abastecimiento para cultivos con mayores necesidades de agua (maíz y alfalfa) que se regaban en turnos largos (mayores a 10 días). Además, estas acequias de hormigón

presentaban pérdidas considerables por filtraciones debidas al deterioro causado por el alto contenido en yesos de los suelos de la zona (Jiménez-Aguirre, 2017).

En el proceso de modernización se construyeron una serie de balsas de almacenamiento y un sistema presurizado de distribución del agua que alimenta a cerca de 300 hidrantes de riego situados a pie de parcela. El sistema de bombeo y el de apertura y cierre de hidrantes y válvulas se encuentra automatizado, gestionándose desde un punto central de control por parte de la propia comunidad de regantes. Además se repararon y elevaron sobre el terreno las acequias los dos canales principales. El coste total de la modernización ascendió a 22.856.925 euros, contando sus tres fases. Así, la inversión por hectárea ascendió a 5.625 euros (WWF, 2014).

## 6.2 Florida de Liébana (Salamanca)

El proyecto de modernización de Florida de Liébana tuvo como objetivo la sustitución de un sistema de gravedad por turnos, a partir de agua circulante por un canal y una red de acequias, por otro sistema automatizado que suministra el agua a presión a hidrantes de riego en cada parcela a través de una red presurizada que capta el agua desde un azud situado en el río Tormes. La comunidad de regantes cuenta con una concesión de uso de agua de 1,4 m<sup>3</sup>/s que funcionaba entre el 1 de abril y el 1 de octubre, con un volumen máximo de consumo de 7,2 hm<sup>3</sup> anuales.

Según el proyecto original de modernización de regadío, la superficie de riego incluida en la concesión de esa zona regable ascendía a 1.227,9 hectáreas, aunque la **superficie regada real previa a la modernización** era algo inferior y se encontraba **en torno a las 1.150 hectáreas**, según datos de la confederación hidrográfica del Duero.

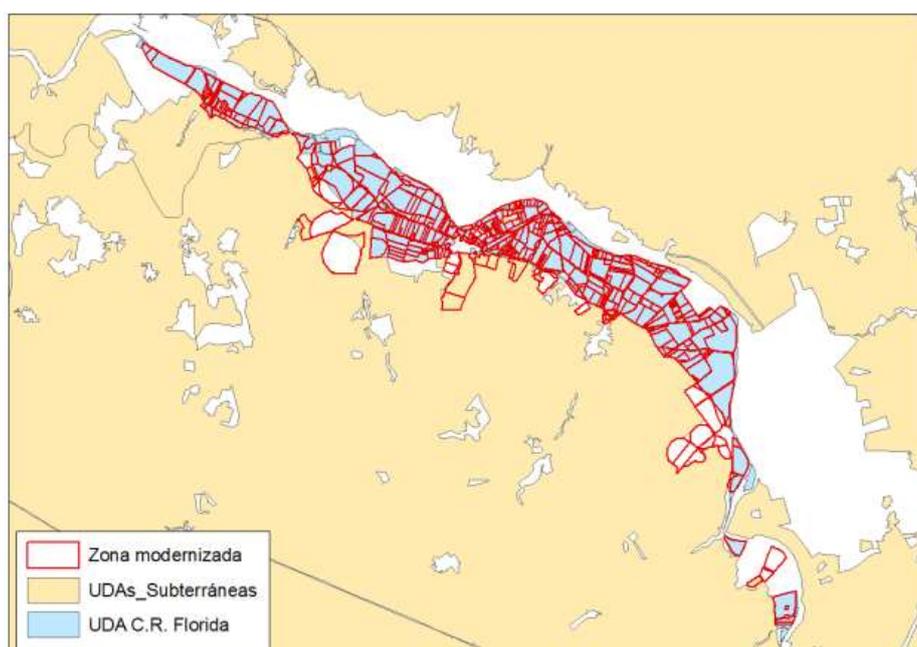
Antes de la modernización, el personal de la Confederación Hidrográfica del Duero (CHD) manejaba la compuerta del canal y la mantenía abierta en continuo, cerrándola tras los episodios de lluvias y limitando el caudal circulante (manteniendo la trampilla entreabierto) en las épocas de menores necesidades hídricas de los cultivos. No obstante, no existen mediciones de los caudales anuales suministrados. Además, varios años antes de la modernización un porcentaje importante de los cultivos se regaban ya mediante sistemas de aspersión fija y pívot central. El principal cultivo en extensión y consumo antes y después de la modernización es el maíz. Una característica que la diferencia es la existencia de cambios en la zona que se riega a través del sistema modernizado en relación a la zona regable previa.

La **modernización de regadíos se ejecutó entre los años 2007 y 2009**, con un coste previsto total de 8.038.000 €, aportados en un 20% por la Junta de Castilla y León, en un 36,8% por la SEIASA (sociedad estatal), en un 19,2% por la Unión Europea y en un 24% por la comunidad de regantes. Según la información del proyecto de modernización, **la superficie regable modernizada se estima en 1.300 hectáreas**, con una dotación aproximada de 1,9 l/s. La estimación del “ahorro de consumo de agua” realizada por la SEIASA es de 3,52 hm<sup>3</sup> anuales.

**La delimitación oficial de la zona regable, a la que se ajusta la concesión de uso de agua para riego, muestra discrepancias con la superficie final del diseño de la zona regable y el ejecutado en el proyecto de modernización.** Según se recoge en una resolución del Consejo de Transparencia del Gobierno de España (resolución 730/2018), la Comunidad de Regantes estima que en torno a 80 hectáreas incluidas en el elenco de parcelas de la concesión de la

Comunidad de Regantes no han sido modernizadas, mientras que aproximadamente 240 hectáreas no amparadas por esta concesión han sido incluidas en el proyecto de modernización y se vienen regando desde entonces utilizando la infraestructura de riego construida con la modernización. Esta situación se recoge en la figura 5, que muestra la comparación entre la superficie regable asociada a la UDA 200019 de “Comunidad de regantes de Florida” según recoge la Confederación Hidrográfica del Duero, y la superficie regable asociada al proyecto de modernización llevado finalmente a cabo.

Igualmente se ha comprobado que la mayor parte de la superficie modernizada que se sitúa fuera de la concesión de la C.R. de Florida de Liébana no se encuentra dentro de las UDAs de riego con aguas subterráneas definidas por la CHD (ver figura 5). No obstante, y a pesar de esta situación irregular, fueron incluidas en el proyecto de modernización.



**Figura 5.** Comparativa entre la superficie con concesión de la zona regable, la zona finalmente modernizada, y la ubicación de las zonas donde existen expedientes de autorización de aguas privadas para el riego con aguas subterráneas

### 6.3 Zona regable de Peñarroya (Ciudad Real)

La Comunidad de Regantes del Pantano Estrecho de Peñarroya fue constituida en el año 1963, después de la construcción del embalse de Peñarroya en 1959. Cubre en torno a 7.700 hectáreas regables y agrupa a aproximadamente 2.000 comuneros. Engloba parte de los términos municipales de Argamasilla de Alba, Campo de Criptana y Tomelloso (Ciudad Real) y se ubica dentro de la demarcación hidrográfica del Guadiana (zona de la Cuenca Alta del Guadiana).

La zona regable se atiende a partir de aportes desde el embalse de Peñarroya (ver figura 6), que recoge las salidas de aguas superficiales del Campo de Montiel, parte de las cuales provienen de aportes desde el acuífero del Campo de Montiel, declarado como sobreexplotado. Además, la zona regable de Peñarroya se ubica dentro del **acuífero de la Mancha Occidental, declarado en situación de sobreexplotación desde el año 1987**, y cuyo

estado cuantitativo se relaciona de forma directa con el estado de conservación del humedal de las Tablas de Daimiel. Esta situación supone un motivo adicional para refinar la contabilidad hídrica de los cambios producidos como consecuencia de la modernización. El agua se transporta a través del canal del Guadiana, que cruza la zona regable y continua hacia el norte.

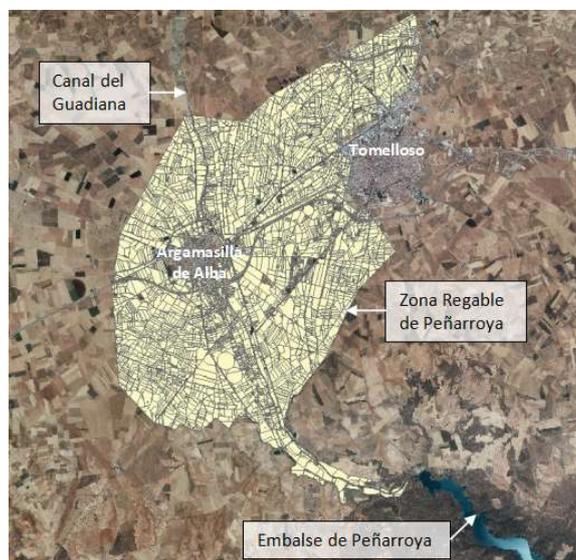


Figura 6. Localización de la zona regable de Peñarroya

Antes del proceso de modernización el riego ya se encontraba tecnificado en su totalidad, prevaleciendo después de la modernización el riego por goteo sobre el riego por aspersión. En esta zona, los cultivos predominantes son diferentes a las otras dos zonas regables analizadas, siendo el **cultivo más extendido el viñedo**, y regándose cultivos hortícolas en verán como el melón, la sandía, el pimiento, el tomate o la cebolla. Los retornos se producen en forma de aportaciones de aguas subterráneas al acuífero, lo que también es un elemento diferencial. Por último, la comunidad de regantes ha facilitado datos detallados acerca del uso diario de agua en las parcelas de dos de los sectores de riego, lo cual ha sido especialmente útil para poder ajustar y validar la metodología para la estimación de la evapotranspiración de los cultivos regados.

En las campañas previas a la **modernización (2006-2009)** se acordaron desembalses por regadío en torno a 13,5 hm<sup>3</sup> por año (según se ha podido consultar en los informes anuales de balances del año hidrológico publicados anualmente por el ministerio), siendo en concreto de 13,5 hm<sup>3</sup> para 2008 y 12,5 hm<sup>3</sup> para 2009, que han sido los dos años considerados en nuestro estudio.

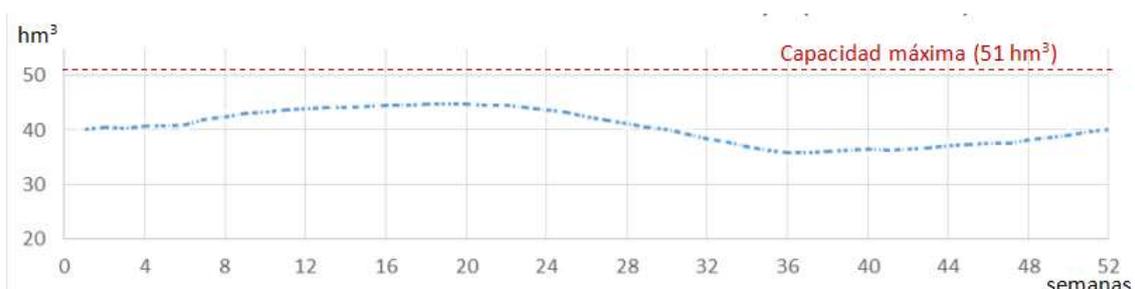


Figura 7. Volumen medio almacenado en el embalse de Peñarroya (2011-2020) (basado en datos del SAIH)

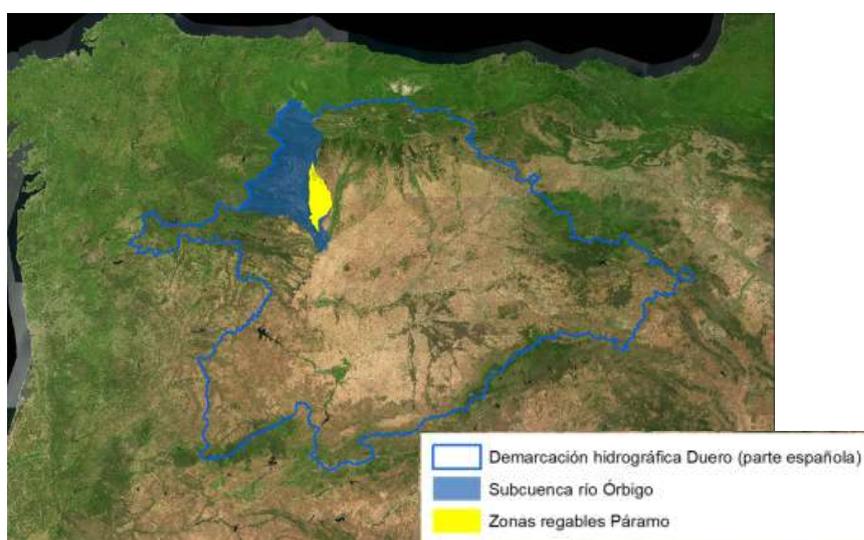
## 6.4 Zonas regables del Páramo de León (León)

La región del Páramo de León se encuentra dentro de la demarcación hidrográfica del Duero (ver figura), y sus zonas regables se dividen en Páramo–Páramo Medio, Páramo Bajo, Velilla y Villadangos. Las características principales de estas cuatro zonas regables (según datos de la IDE de la Confederación Hidrográfica del Duero (CHD) – sistema Mírame) se recogen en el Cuadro 4.

**Cuadro 4.** Principales características de las zonas regables incluidas en el estudio (Fuente: IDE de la CHD y elaboración propia).

	Páramo - Páramo medio	Páramo Bajo	Velilla y Villadangos	Total
Extensión (ha)	25.468	32.982	7.866	66.316
% modernizado	81,5%	82,5%	0%	72%
Superficie regable asignada (ha)	20.427	22.000	7.004	49.483
Superficie estimada de riego (ha)	19.899	22.553	6.062	48.514
Volumen demandado (hm3)	111,52	95,00	45,34	251,86

Fuente: ICATALIST



**Figura 8.** Delimitación geográfica de la zona de trabajo (ICATALIST)

Muchos de los sectores de la zona regable de Páramo–Páramo Medio se modernizaron a través de varios proyectos entre 2009 y 2016, quedando pendientes los sectores IV y VI, para los que existe un proyecto aprobado en fase de adjudicación.

En la zona regable de Páramo Bajo se modernizaron igualmente muchos de los sectores de riego en el mismo periodo con la excepción de dos de sus sectores (Sectores VII y VIII) cuyo proyecto de modernización está en marcha.

Las zonas regables de Velilla y Villadangos tienen también proyectos de modernización ya aprobados, aunque pendientes de ejecución.

Estas zonas regables ocupan 66.316 ha, de las cuáles 47.990 ha se localizan en zonas ya modernizadas y 18.333 ha están en zonas con proyectos de modernización ya aprobados pendientes de ejecución.

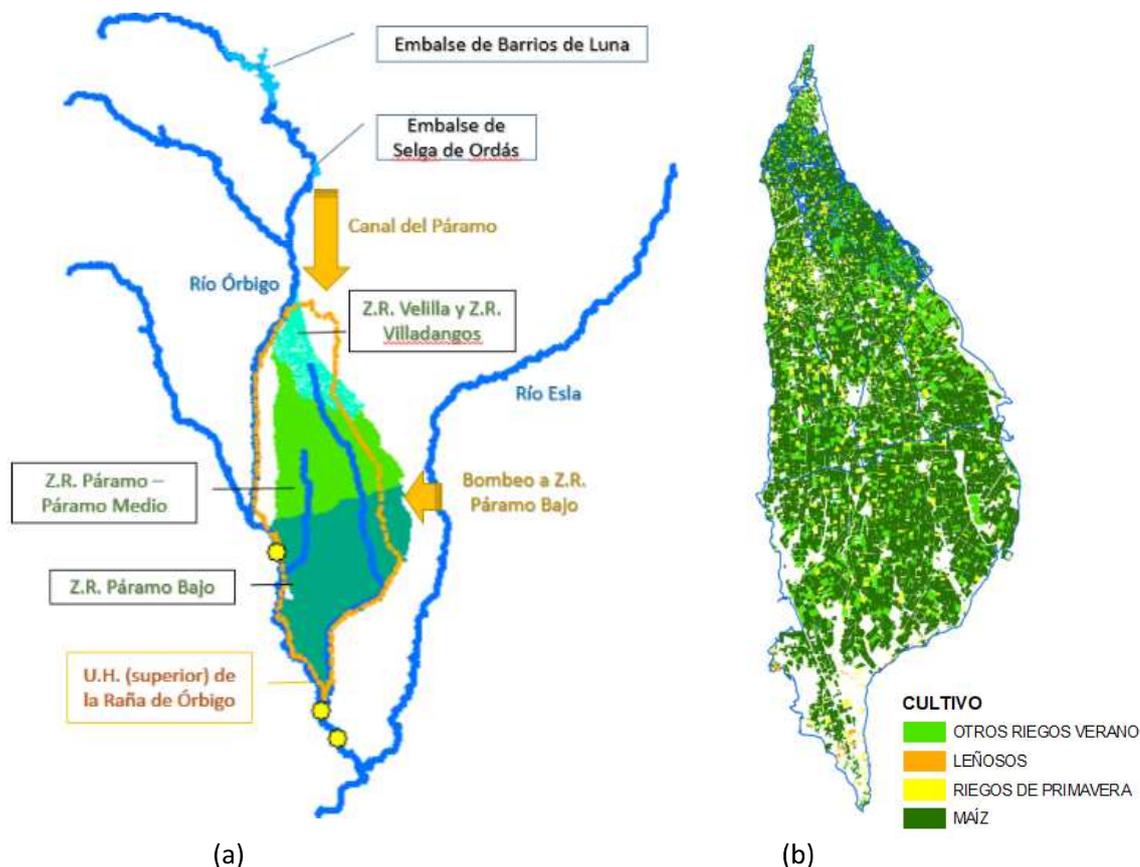


Figura 9. (a) Esquema para la elaboración del balance hidrológico en las zonas regables del Páramo de León y (b) mapa de cultivos regados en 2020 (ICATALIST)

Con este fin, se han elaborado **mapas de cultivos regados para dos años anteriores (2002 y 2005) y dos años posteriores (2020 y 2021) al proceso de modernización** (ver figura 9b). Estos mapas toman las subparcelas catastrales como base cartográfica, lo que asimila su escala de trabajo a un 1:5.000.

Por este motivo, en el presente estudio nuestra aproximación se ha centrado en el uso exclusivo de datos de Sentinel 2. Así, lo que hemos realizado es una comparación entre los datos registrados en las zonas modernizadas y no modernizadas a partir de las series temporales de primavera-verano de los años 2020 y 2021. Posteriormente, se ha considerado que los valores de consumo de las zonas no modernizadas en 2020-2021 deben ser similares a los de las zonas ahora modernizadas antes de la ejecución de los proyectos de tecnificación del regadío.

## 7. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en los casos de estudio muestran que la la modernización ha provocado cambios significativos en las distintas fracciones en que se reparte el agua suministrada:

- **En la zona regable de Almodóvar**

Los retornos útiles, que pueden ser utilizados para otros usos en la cuenca, incluyendo el uso ambiental, se reducen de forma drástica después de la modernización, pasando de 17,68 hm<sup>3</sup> a 2,02 hm<sup>3</sup>. Esta variación supone una reducción del 88,5% en los retornos que pueden ser utilizados por otras zonas de riego ubicadas aguas debajo de la zona regable de Almodóvar. En (Jiménez-Fernández e Isidoro, 2012) estima la reducción en el drenaje desde los cultivos de maíz tras la modernización en un 91% (desde 5.490 a 500 m<sup>3</sup>/ha). Por otro lado, los datos de caudal medio mensual en la estación de aforo de La Pardina en el barranco de La Violada durante los meses de riego (mayo-octubre) de varios años previos y posteriores a la modernización muestran un descenso aproximado de 15 hm<sup>3</sup>, que resulta de un orden de magnitud similar a la estimación realizada de reducción de los retornos útiles de riego.

El consumo de agua de riego por evapotranspiración productiva de los cultivos aumenta desde los 15,9 hm<sup>3</sup> hasta los 17,9 hm<sup>3</sup>, aún a pesar de que el volumen de agua suministrado para riego se reduce en aproximadamente 12,4 hm<sup>3</sup>. Esto supone un aumento del consumo evaporativo beneficioso del agua aplicada por riego de un 12,5%.

El consumo de agua de riego por evaporación no productiva también aumenta, debido sobre todo al uso de sistemas de riego mediante aspersión, que incrementa las salidas a la atmósfera por evaporación y arrastre

- **En la zona regable de Florida de Liébana**

Los retornos útiles, que pueden ser utilizados para otros usos en la cuenca, incluyendo el uso ambiental, se reducen de forma drástica después de la modernización, pasando de 6,36 hm<sup>3</sup> a 0,41 hm<sup>3</sup>.

El consumo de agua de riego por evapotranspiración productiva de los cultivos aumenta un 48%, desde los 3,79 hm<sup>3</sup> hasta los 5,61 hm<sup>3</sup>. Esto se debe a dos factores diferentes. Por un lado, la superficie regada ha aumentado de forma importante tras la modernización. Por otro lado, el volumen consumido por los cultivos aumenta, estando esta situación ligada al aumento de productividad agronómica facilitada por el aumento de la eficiencia en la aplicación del riego. Por ejemplo, el volumen medio consumido por el maíz (estimado a partir de la integración de técnicas de teledetección con un modelo de crecimiento de cultivo) aumenta en un 24%. Esta aproximación resulta coherente con la estimación de productividad para el maíz de entre un 30 y un 40% que aparece en el proyecto de modernización.

El consumo por evaporación no productiva también aumenta, debido sobre todo a la mayor superficie de riego mediante sistemas de aspersión, que incrementa las salidas a la atmósfera por evaporación y arrastre.

- **En la zona regable de Peñarroya**

Los retornos útiles que pueden ser utilizados para otros usos en la cuenca se corresponden con las infiltraciones al acuífero de la Mancha Occidental. Según el análisis el volumen infiltrado se reducen después de la modernización en 0,30 hm<sup>3</sup>.

El consumo de agua de riego por evapotranspiración productiva de los cultivos aumenta desde los 10,4 hm<sup>3</sup> hasta los 10,9 hm<sup>3</sup>. Los cultivos herbáceos se mantienen tanto en superficie media como en consumo por evapotranspiración. Sin embargo, sí que se aprecia un aumento del consumo en el viñedo, que es el cultivo con mayor superficie de riego. Esto se produce en gran parte por la transformación de viñedos en vaso a espaldera, con mayores necesidades hídricas pero generalmente con mayor producción y grado de automatización agrícola. Este tipo de transformación, no obstante, se está produciendo de forma generalizada en la llanura manchega en las últimas dos décadas por lo que no puede considerarse una consecuencia directa de la modernización

El consumo por evaporación no productiva se reduce, principalmente como consecuencia del mayor grado de riego nocturno después de la modernización gracias al sistema de programación de riegos, reduciéndose así las pérdidas por evaporación y arrastre de los sistemas de riego por aspersión.

- **En las zonas regables del Páramo**

Los retornos útiles se reducen de forma drástica después de la modernización, pasando de 154 hm<sup>3</sup> a 14 hm<sup>3</sup>.

El consumo de agua de riego por evapotranspiración productiva de los cultivos aumenta desde los 168 hm<sup>3</sup> hasta los 198 hm<sup>3</sup>, aún a pesar de que la demanda de agua riego se reduce en aproximadamente un 34%.

El consumo de agua de riego por evaporación no productiva también aumenta, debido sobre todo al uso de sistemas de riego mediante aspersión, que incrementa las salidas a la atmósfera por evaporación y arrastre

Todos los resultados anteriores para cada caso muestran que **la modernización de regadíos tiende a producir un incremento del consumo de recursos hídricos** y una disminución de los recursos disponibles para otros usos a escala de cuenca (ver Cuadro 5).

Los estudios que realizan balances detallados de los cambios en el volumen de suministro siguiendo la “ley de la conservación de las masas” lo corroboran, y generalmente comparten la conclusión de que el aumento de la eficiencia en la modernización supone una paradoja de la eficiencia (o paradoja de Jevons) en relación con el supuesto ahorro de agua, creando una reducción en el volumen disponible para otros usos previamente existentes que se alimentaban con los retornos de riego. Los resultados muestran una gran diferencia entre los ahorros de agua esperados según los planes de las modernizaciones que se han analizado y las diferencias entre los balances hídricos antes y después de cada modernización, como se aprecia en el siguiente cuadro:

En definitiva, los resultados obtenidos se encuentran bien alineados con otros estudios de referencia, encontrándose muy bien alineados con otras mediciones o estimaciones, y reflejando de forma fiable el tipo de cambios que se han producido en el uso y consumo del agua como consecuencia de los procesos de modernización analizados.

**Cuadro 5.** Comparativa para cuatro zonas modernizadas entre los ahorros estimados por los proyectos de modernización y el balance de agua disponible para otros usos en la cuenca según estudio de WWF.

	Almudévar		Florida de Liébana		Peñarroya		Páramo de León	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
Volumen medio suministrado (hm <sup>3</sup> )	35,1	22,7	10,7	7,0	13,0	12,0	321,9	212,9
Reducción del agua suministrada para el riego (hm <sup>3</sup> )	-	12,44	-	3,72	-	0,98	-	109,45
Consumo por evapotranspiración productiva (hm <sup>3</sup> )	15,93	17,91	3,79	5,61	10,44	10,91	149,51	174,15
Consumo no productivo por evapotranspiración (hm <sup>3</sup> )	1,68	2,57	0,58	0,97	0,72	0,58	18,31	24,11
Consumo por evapotranspiración (hm <sup>3</sup> )	17,60	20,44	4,37	6,59	11,16	11,49	167,82	198,25
Porcentaje del volumen suministrado consumido por evapotranspiración de cultivos	45,4%	78,9%	35,3%	80,2%	80,3%	90,8%	-	-
Retornos útiles disponibles para otros usos (hm <sup>3</sup> )	17,68	2,02	6,36	0,41	1,85	0,58	154,45	13,81
Reducción de los retornos útiles para otros usos (hm <sup>3</sup> )	-	15,66	-	5,95	-	1,28	-	140,64
Balance de agua disponible para otros usos en la cuenca (hm <sup>3</sup> /año)	-	-3,20	-	-2,23	-	-0,3	-	-31,8

Fuente: ICATALIST

## 8. CONCLUSIONES

La consecución de ahorros de agua ha sido uno de las principales motivos que se han esgrimido para justificar las inversiones realizadas en modernizaciones de regadíos, bajo la asunción de que la tecnificación de los sistemas de riego puede ahorrar importantes volúmenes de agua usados en agricultura que pueden ser puestos a disposición de otros usos, entre los que se considera el uso ambiental.

No obstante, en los casos estudiados, aunque los procesos de modernización han tenido un claro efecto de **incremento de la productividad agronómica** al mismo tiempo que se reduce el suministro (uso) de agua gracias al aumento de la eficiencia de riego, este aumento de productividad se produce a costa de un **aumento del agua consumida (evapotranspirada)** y de la disminución de los retornos de riego útiles, creando un **déficit hídrico en la cuenca hidrográfica**. Como consecuencia directa, el **volumen de agua disponible para otros usos** (agrícola, ganadero, urbano, industrial o ambiental) aguas abajo **se reduce de forma significativa** en todos los casos.

En concreto, en todos los casos analizados en los estudios presentados en este documento, se ha producido un aumento del consumo ligado a los procesos de modernización, al que han contribuido los siguientes factores:

- Aumento del consumo de agua por hectárea al mejorar la disponibilidad hídrica, lo que permite corregir el déficit hídrico en el cultivo debido a la mayor separación entre riegos.
- Aumento de las superficies regadas, tanto por la aparición de siembras de distintos cultivos sobre la misma superficie dentro de una misma campaña (como en el ejemplo de Almodévar) como por la extensión del riego a zonas no incluidas previamente en la modernización (como se ha detectado en el caso de la zona regable de Florida de Liébana).

Así, cualquier escenario de modernización realista debería contemplar que si no se reducen suficientemente las aportaciones al regadío se producirá un incremento del consumo de agua y por tanto una disminución de los recursos disponibles a escala de cuenca. En este sentido, la modernización del regadío no constituye necesariamente una medida para la consecución de la mejora del estado de las masas de agua, sino que por el contrario, puede suponer un incremento de consumo que debe evaluarse de cara al cumplimiento de los objetivos de planificación hidrológica.

Esto supone que, en la práctica, **el ahorro para la cuenca sólo pueda alcanzarse en casos donde no se produzca un incremento significativo del consumo total por evapotranspiración**. En este sentido las modernizaciones donde se generalice el **riego por goteo** y se prime la aplicación de los **riegos en periodo nocturno** pueden limitar el aumento del consumo. Además, en teoría la reducción de la evapotranspiración no beneficiosa así como de los retornos no recuperables puede permitir un aumento de la evapotranspiración de los cultivos al tiempo que se limita un posible déficit en el balance de cuenca. Sin embargo, en la literatura no se encuentran evidencias de casos que muestren que este tipo de alternativas puedan suponer un aumento significativo de la productividad de los cultivos al mismo tiempo que no producen un déficit de uso de agua en la cuenca.

La **metodología** aplicada ha mostrado su **eficacia para evaluar la fracción evapotranspirada**, en particular en los años posteriores a la modernización cuando se han podido utilizar series temporales amplias de imágenes Sentinel. El análisis previo a la modernización ha mostrado limitaciones derivadas de la menor disponibilidad de imágenes y del hecho de que la intercalibración de valores de NDVI de los satélites Landsat y Sentinel es una aproximación con un margen de error no controlado. Así, en el caso de Peñarroya la metodología no ha mostrado diferencias significativas entre los consumos de los cultivos antes y después, mientras que en las otras dos zonas regables sí que se han podido detectar variaciones. Por tanto, la aplicación de la metodología para fechas previas a los procesos de modernización resulta menos fiable aunque sí que proporciona una aproximación válida sobre los cambios producidos. En este sentido, los aumentos en productividad (kg/ha) de los cultivos de maíz en las zonas regables de Almodívar y Florida de Liébana resultan acordes con los aumentos estimados en necesidades netas de los cultivos. Por tanto, la metodología se puede mejorar mediante una modelización más detallada y datos de entrada más precisos.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] WWF (2015). Modernización de regadíos: un mal negocio para la naturaleza y sociedad. [http://awsassets.wwf.es/downloads/modernizacion\\_regadios.pdf](http://awsassets.wwf.es/downloads/modernizacion_regadios.pdf).
- [2] WWF (2014). Estudio de los efectos ambientales y socioeconómicos de la modernización de regadíos en España.
- [3] Batchelor, C., Hoogeveen J., Faurès, J.M. and Peiser, L. (2017) Water accounting and auditing. A sourcebook. FAO Water Reports n. 43. Rome, FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/a-i5923e.pdf>.
- [4] Gutiérrez-Martín, C. y Montilla-López, N. (2018) Modernización de regadíos: un éxito para la naturaleza y la sociedad. Universidad de Córdoba.
- [5] Perry, C. J., y Steduto, P. (2017). Does improved irrigation technology save water? A review of the evidence. Cairo, FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/I7090EN/i7090en.pdf>
- [6] Adamala, E., Rajwade, Y. A. y Reddy, Y. V. K. (2016). Estimation of wheat crop evapotranspiration using NDVI vegetation index. Journal of Applied and Natural Science, vol. 8, no. 1, pp. 159–166.
- [7] Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M., (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage paper 56. FAO, Rome, Italy.
- [8] Bausch, W.C., Neale, C.M.U. (1987). Crop coefficients derived from reflected canopy radiation—A concept. Trans. ASAE, 30, 703–709.
- [9] Bausch, W.C. (1993) Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. Remote Sensing of Environment 46, 213–222.
- [10] Bea Martínez, M., Rodríguez Esteban, J. A. y Montesinos Aranda, S. (2013): “Uso de

técnicas de información geográfica para la discriminación de superficies regadas”, *GeoFocus*, nº 13-1, p. 220-245.

- [11] Calera, A., Campos, I., Osann, A., D'Urso, G., Menenti, M., (2017). Remote sensing for crop water management: from ET modelling to services for the end users. *Sensors* 17, 1104.
- [12] Campos, I., Neale, C.M.U., Calera, A., Balbontin, C., y González-Piqueras, J. (2010). Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agricultural Water Management* 98, 45–54.
- [13] Campos, I., Balbontin, C., González-Piqueras, J., González-Dugo, M.P., Neale, C., Calera, A. (2016). Combining water balance model with evapotranspiration measurements to estimate total available water soil water in irrigated and rain-fed vineyards. *Agricultural Water Management* 165, 141–152.
- [14] D'Urso, G. (2001). *Simulation and Management of On-Demand Irrigation Systems: A Combined Agrohydrological and Remote Sensing Approach*. Wageningen University: Wageningen, The Netherlands.
- [15] D'Urso, G. (2010) Current Status and Perspectives for the Estimation of Crop Water Requirements from Earth Observation. *Italian Journal of Agronomy* 5, 107–120.
- [16] Farg, E., Arafat, S.M., Abd El-Wahed, M.S., EL-Gindy, A.M. (2012). Estimation of Evapotranspiration ET<sub>c</sub> and Crop Coefficient K<sub>c</sub> of Wheat, in south Nile Delta of Egypt Using integrated FAO-56 approach and remote sensing data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 15, 83–89
- [17] Glenn, E. P., Neale, C. M. U., Hunsaker, D. J. and Nagler, P. L. (2011). Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems. *Hydrological Processes*, vol. 25, no. 26, pp. 4050–4062.
- [18] Gontia, N. K. y Tiwari, K. N. (2010). Estimation of crop coefficient and evapotranspiration of wheat (*Triticum aestivum*) in an irrigation command using remote sensing and GIS. *Water Resources Management*, vol. 24, no. 7, pp. 1399–1414.
- [19] González-Dugo, M.P., Mateos, L. (2008) Spectral vegetation indices for benchmarking water productivity of irrigated cotton and sugarbeet crops. *Agricultural Water Management* 95, 48–58.
- [20] 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. *Agric. For. Meteorol.* 149, 1843–1853.
- [21] Johnson, L.F., Trout, T.J. (2012) Satellite NDVI assisted monitoring of vegetable crop evapotranspiration in California's San Joaquin Valley. *Remote Sensing* 4, 439–455.
- [22] Mateos, L., González-Dugo, M.P., Testi, L., Villalobos, F.J. (2013). Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. I. Method validation. *Agricultural Water Management* 125, 81–91.
- [23] Ozdogan, M., Yang, Y., Allez, G. y Cervantes, C. (2010): Remote sensing of irrigated agriculture: Opportunities and Challenges. *Remote Sensing: Special issue in Global Croplands*, pp. 2274-2304.
- [24] Parmar, H. V. y Gontia, N. K. (2016). Remote sensing based vegetation indices and crop

- coefficient relationship for estimation of crop evapotranspiration in Ozat-II canal command. *Journal of Agrometeorology*, vol. 18, no. 1, pp. 137–139.
- [25] Pôças, I., Paço, T.A., Paredes, P., Cunha, M., Pereira, L.S. (2015). Estimation of actual crop coefficients using remotely sensed vegetation indices and soil water balance modelled data. *Remote Sensing* 7, 2373–2400.
- [26] Rafn, E.B., Contor, B., Ames, D.P. (2008) Evaluation of a Method for Estimating Irrigated Crop-Evapotranspiration Coefficients from Remotely Sensed Data in Idaho. *J. Irrig. Drain. Eng.* 134, 722–729.
- [27] Reyes-González, A., Hay, C., Kjaersgaard, J. and Neale, C. M. U. (2015). Use of remote sensing to generate crop coefficient and estimate actual crop evapotranspiration, in ASABE Annual international meeting, New Orleans LA, USA, 2015.
- [28] Reyes-González, A., Trooien, T., Kjaersgaard, J., Hay, C., y Reta-Sánchez, D. G. (2016). Development of crop coefficients using remote sensing-based vegetation index and growing degree days. *Proceedings of the ASABE Annual International Meeting, Orlando, Fla, USA, July 2016.*
- [29] Reyes-González, A., Kjaersgaard, J., Trooien, T. Hay, C. y Ahiablame, L. (2017) Estimation of Crop Evapotranspiration Using Satellite Remote Sensing-Based Vegetation Index. *Hindawi - Advances in Meteorology*, volume 2018, Article ID 4525021, 12 pages.
- [30] Rocha, J., Perdigao, A., Melo, R. and Henriques, C. (2012) Remote sensing based crop coefficients for water management in agriculture. Chapter 8, *INTECH*, pp. 167–192, 2012.
- [31] Tello, J., Gómez-Báguena, R. y Casterad, M. A. (2017) Comparación y ajuste en zonas agrícolas de índices de vegetación derivados de Landsat-8 y Sentinel-2. *XVII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Murcia, 3-7 octubre 2017.*
- [32] Torres, E.A., y Calera, A. (2010). Bare soil evaporation under high evaporation demand: A proposed modification to the FAO-56 model. *Hydrol. Sci. Journal* 55, 303–315.
- [33] Vanino, S., Pulighe, G., Nino, P., De Michele, C., Bolognesi, S.F., D'Urso, G. (2015). Estimation of Evapotranspiration and Crop Coefficients of Tendone Vineyards Using Multi-Sensor Remote Sensing Data in a Mediterranean Environment. *Remote Sensing* 7, 14708–14730.
- [34] Vanino, S., Nino, P., De Michele, C., Falanga Bolognesi, S., D'Urso, G., Di Bene, C., Pennelli, B., Vuolo, F., Farina, R., Pulighe, G., Napoli, R. (2018). Capability of Sentinel-2 data for estimating maximum evapotranspiration and irrigation requirements for tomato crop in Central Italy. *Remote Sensing of Environment* 215 (2018) 452–470.
- [35] Vuolo, F., D'Urso, G., De Michele, C., Bianchi, B., Cutting, M. (2015). Satellite-based irrigation advisory services: A common tool for different experiences from Europe to Australia. *Agricultural Water Management* 147, 82–95