



A-09

DESARROLLO DE UN SERVICIO EXPERIMENTAL DE TELEDETECCIÓN EN LOS RIEGOS DEL PORMA (LEÓN) PARA EL CÁLCULO AJUSTADO DE NECESIDADES HÍDRICAS Y MEJORA EN LA GESTIÓN DEL REGADÍO

Valdés Mora, I (1); Escudero Barbero, R (2); Rubio Melón, A (3); Fernández Pesado, P (4); Checa Alonso, MJ (5); Sanchez Hernández, B (6); Iglesias Gómez, S (7).

¹ Responsable Técnico de Proyecto OPTIREG1316, Gerencia de Ingeniería y Edificación (Tragsatec), Julián Camarillo 6, 28037 Madrid, ivm@tragsa.es

² Jefe de Departamento de Teledetección, Gerencia de Sistemas de Información Geográfica (Tragsatec), Julián Camarillo 6, 28037 Madrid, reb@tragsa.es

³ Coordinador de Obras (Tragsa), Cruz Roja de León 26 A. 24008 León, arubio@tragsa.es

⁴ Analista (Tragsa), Cruz Roja de León 26 A. 24008 León, pfernand@tragsa.es

⁵ Jefe de Grupo de Actuaciones y Proyectos, Dpto de Teledetección, Gerencia de Sistemas de Información Geográfica (Tragsatec), Julián Camarillo 6, 28037 Madrid, mjc@tragsa.es

⁶ Jefe de Actuaciones y Proyectos, Dpto de Teledetección, Gerencia de Sistemas de Información Geográfica (Tragsatec), Julián Camarillo 6, 28037 Madrid, bsh@tragsa.es

⁷ Responsable de apoyo y supervisión de proyecto OPTIREG1316. Subdirección de I+D+i (Tragsa), Conde Peñalver 84, Madrid, siglesia@tragsa.es

Resumen

El proyecto de innovación tecnológica OPTIREG Eficiencia Hídrica, impulsado por el Grupo Tragsa, tiene entre sus objetivos principales introducir el uso de la teledetección, como tecnología de apoyo a la gestión hídrica. Para ello se está desarrollando un servicio web gis experimental que servirá de repositorio único de imágenes y de sus productos derivados y que facilitará, tanto a los regantes, como a los gestores del riego, el seguimiento de los cultivos y de sus necesidades hídricas.

Diversos estudios científicos han demostrado la buena relación lineal existente entre el índice de vegetación normalizado (NDVI), derivado de las imágenes de satélite, y el coeficiente de cultivo, K_c (Torres, 2010), utilizado en el cálculo de la evapotranspiración y las necesidades hídricas. Una primera evaluación de los resultados obtenidos en la campaña 2015 para los principales cultivos en regadío en la zona de estudio del Porma (León), indica que el K_c calculado a partir del NDVI, se ajusta mejor que el de FAO. Por ello, se considera un sistema muy válido como referencia para ajustar no sólo la cantidad de agua, sino también para determinar el momento más adecuado de riego, que redundará en una mayor eficiencia hídrica.

1) Introducción y objetivos

Los planes de modernización de regadíos han sido el mecanismo más importante para la mejora de la gestión y el uso del agua, habiendo conseguido tanto una reducción del consumo como un aumento de la eficiencia en su uso.

La Teledetección es una de las tecnologías que hoy en día ofrecen mayor potencial de desarrollo para integrarse en los sistemas de telecontrol de riego, contribuyendo a conseguir una mayor eficiencia hídrica. Se trata de una tecnología que en los últimos años se ha beneficiado de las grandes inversiones realizadas en las misiones espaciales de

observación de la Tierra, como es el caso en Europa, del Programa Copernicus y su constelación de satélites Sentinel.

El proyecto de innovación tecnológica OPTIREG Eficiencia Hídrica, impulsado por el Grupo Tragsa, tiene como uno de los objetivos principales introducir el uso de la teledetección como tecnología de apoyo en el ámbito de la gestión hídrica. Este proyecto está desarrollando un servicio de teledetección experimental, casi en tiempo real, que cubre de momento unas 17.000 ha de regadío pertenecientes a varias comunidades de regantes gestionadas por Tragsa en el Porma (León).

Distintos trabajos experimentales han derivado el coeficiente de cultivo (K_c) a partir de índices de vegetación obtenidos con imágenes de satélite, como el de Calera et al, 2014. Con este estudio se pretende conseguir, un mayor ajuste de la curva de K_c a lo largo del periodo de desarrollo fenológico, que el ofrecido en las tablas de cultivo del estudio de la FAO 56 de riegos y drenajes, empleadas tradicionalmente para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y las necesidades hídricas.

2) Materiales y métodos

2.1. Imágenes multiespectrales obtenidas por satélite

Los sensores de observación de la Tierra han sufrido un enorme avance en los últimos años, optimizando sus características de:

- Resolución espacial, compitiendo en capacidad de captura y resolución espacial con las cámaras fotogramétricas, alcanzando los 50 cm de tamaño de pixel.
- Resolución espectral y radiométrica de algunos sensores, con mayor número de bandas espectrales y mayor sensibilidad (10 – 12 bits).
- Resolución temporal, con periodos de revisita cada vez más cortos, gracias a la existencia de constelaciones de satélites, como son el caso de las misiones Spot 6-7 o Pléiades 1A-1B, empleadas en este proyecto.

Estas innovaciones tecnológicas, junto con la apertura de los archivos de imágenes de las agencias espaciales de NASA (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) y ESA (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>), que ofrecen imágenes de libre distribución y media resolución espacial (30 metros de tamaño de pixel para Landsat y 10 metros para Sentinel2), al día siguiente de su captura, están dando un enorme impulso a las aplicaciones de la teledetección.

Además de las capacidades comentadas, la característica más importante de las imágenes multiespectrales obtenidas por satélite es que, gracias a su calibración radiométrica, es posible realizar conversiones a valores físicos de reflectividad, dotándolas de una homogeneidad que las hace perfectamente comparables entre sí en estudios multitemporales. Es decir, son susceptibles de ser procesadas mediante técnicas de teledetección para obtener parámetros biofísicos, a partir de los cuales se calculan índices de vegetación, como el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Éste es un indicador probado de la actividad fotosintética de la planta y del que es posible derivar el coeficiente de cultivo (K_c), utilizado en el ajuste de las necesidades hídricas de los cultivos dentro del modelo FAO56 (Allen et al, 1998).

En la campaña de 2015 se utilizaron imágenes Landsat8 OLI de libre distribución, combinadas con una programación específica de imágenes Pléiades y Spot, con el propósito tanto de trabajar con imágenes de mayor resolución espacial (50 cm y 1.5 m, en la banda pancromática respectivamente), como de disponer de una imagen semanal, frecuencia que se ajusta de forma óptima a la programación automatizada del riego en el

Porma. Los productos derivados y entregados en un periodo generalmente inferior a la semana son: imágenes RGB, NDVI y sus variables derivadas, K_{cb} (coeficiente de cultivo basal) y K_c (coeficiente de cultivo).

En la campaña 2016 se ha incorporado al servicio de imágenes las del nuevo satélite de la ESA Sentinel2 que cuenta con unas capacidades espaciales y espectrales mejores que las de Landsat8.

Las principales características técnicas de los tres tipos de imágenes a emplear en la campaña de teledetección OPTIREG 2016 se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales características técnicas de los sensores empleados en OPTIREG.

Satélite y sensor	Ancho de pasada (Swath) en Km	Resolución espectral (nº de bandas y rango espectral)	Resolución espacial de las bandas Ms y Pan	Resolución temporal
LANDSAT 8 OLI	185	10 bandas: Visible, IRC, IRM	30 m Ms 15 m Pan	16 días (8 en zona de solape)
SENTINEL 2A MSI	290	13 bandas: Visible, Borde del Rojo, IRC, IRM	10 a 60 m Ms	10 días
PLÉIADES	20	4 bandas: Visible, IRC	2 m Ms 0.5 m Pan	Programadas 6 imágenes entre Mayo y Septiembre

Dadas las características de las imágenes empleadas, la prioridad para seleccionarlas será: Pléiades, Séntinel y Landsat, por este orden.

2.2. Metodología aplicada para el cálculo de K_c

La metodología aplicada en OPTIREG para el cálculo del K_c a partir de las imágenes de satélite, es la seguida en la Universidad de Albacete y descrita en diversas publicaciones (Calera et al, 2014). Según esta metodología el coeficiente de cultivo (K_c) se determina de forma directa a partir del NDVI derivado de las imágenes de satélite.

El NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) es un índice de vegetación con significado biofísico que informa sobre la actividad vegetativa de las plantas. Este índice se calcula a partir de las bandas roja (R) e infrarrojo cercano (IRC) del espectro electromagnético, donde las diferencias en los valores de reflectividad para la vegetación sana son mayores.

$$NDVI = (IR - R) / (IR + R)$$

Sus valores varían entre -1 y 1, donde los valores más altos indican mayor actividad vegetativa.

En el cálculo del coeficiente de cultivo, K_c , se pueden distinguir dos componentes que reflejan la evaporación directa del suelo y la transpiración de la planta (Wright, 1982).

$$K_c = K_{cb} * K_s + K_e$$

Donde:

K_{cb} , es el coeficiente de cultivo basal.

K_s , es el coeficiente de estrés. Éste varía entre 0 y 1, tomando valores de 1 en ausencia de estrés, como ocurriría en los cultivos en regadío.

K_e , es el coeficiente evaporativo del suelo y expresa la reducción de transpiración que se produce en las plantas como consecuencia del déficit de agua en el suelo.

Para el cálculo de K_c es necesario modelizar la componente evaporativa de la fracción de suelo desnudo, que está relacionada con la superficie efectivamente mojada, el sistema de riego y la frecuencia, las características del suelo, etcétera.

En la metodología propuesta por Calera et al, 2014, la ecuación lineal que relaciona el K_c y el NDVI es:

$$K_c = 1.25 * NDVI + 0.1$$

Según los autores, esta simplificación de la ecuación, conlleva una serie de limitaciones que es importante tener en cuenta a la hora de aplicarla para el cálculo de la ET_c y las necesidades hídricas de los cultivos de estudio. De manera que sólo se considera válida para cultivos herbáceos en regadío (con sistemas de riego tipo pivot o aspersión) que en su fase de máximo desarrollo alcanzan una cobertura completa del suelo. En la fase de nascencia o en el caso de cultivos como los ajos, cebollas, etcétera, donde en su fase de máximo desarrollo no alcanzan una cobertura completa del suelo, la componente evaporativa del suelo puede ser muy alta, y por lo tanto, este método tenderá a infraestimar el valor del K_c .

2.3 Procesado de imágenes de satélite y generación de productos derivados

El procesado de imágenes incluye los siguientes pasos:

- Selección y adquisición de las imágenes, conforme a la prioridad establecida: Pléiades (6 fechas programadas entre mayo y septiembre), Sentinel2 (cada 10 días) y Landsat8 (cada 16 días). El objetivo es disponer de una imagen semanal libre de nubes.
- Procesado de las imágenes de satélite. El procesado estándar de las imágenes consiste en una corrección geométrica y radiométrica de las imágenes que asegure la perfecta superposición de las mismas y las haga radiométricamente comparables entre sí, minimizando las diferencias derivadas de las distintas condiciones de iluminación durante la captura y las vinculadas al sensor.

Las imágenes Landsat8 y Sentinel2 se suministran ya georreferenciadas y en valores de reflectividad al techo de la atmósfera (TOA, Top Of Atmosphere). En el caso de las imágenes Pleiades y Spot6/7 es necesario realizar su ortorrectificación (usando puntos de control sobre el terreno y un modelo digital del terreno) y su transformación a valores de reflectividad TOA.

Además, con el fin de asegurar la congruencia de los valores de NDVI derivados de los distintos sensores de la serie de imágenes de la campaña, se realiza un intercalibrado entre ellas, tomando como referencia el NDVI procedente de Landsat.

- Generación de la máscara de nubes y sombras, con el fin de eliminar éstas de las imágenes. Para crear la máscara de nubes se usa la banda de calidad de los

sensores y las sombras se eliminan a partir de los valores de las bandas del rojo e infrarrojo cercano y medio.

- Elaboración de productos RGB para fotointerpretación. Para cada fecha de imagen se elaboran dos compuestos RGB, uno en falso color infrarrojo creado a partir de las bandas, verde, infrarrojo cercano y rojo y otro en color natural, utilizando las bandas, rojo, verde y azul, cuyos ejemplos se muestran en la Figura 1.

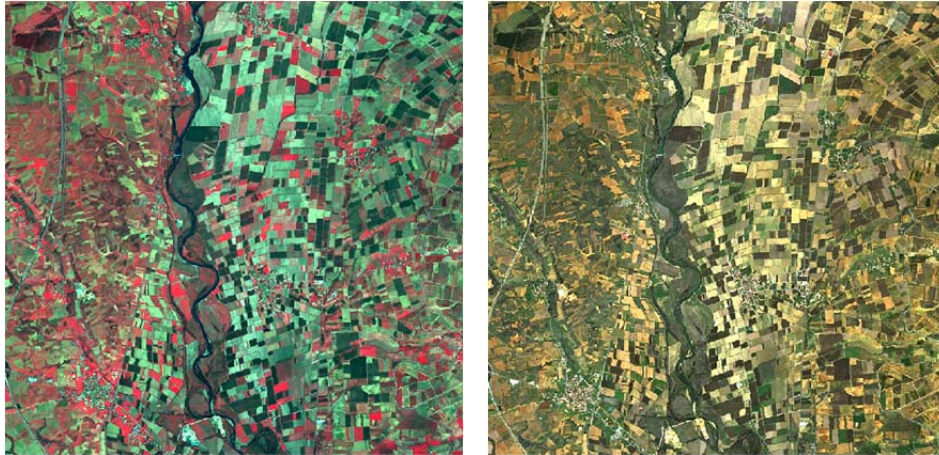


Figura 1. Compuesto RGB de una imagen Landsat8 en falso Falso Color infrarrojo (izquierda) y en color natural (derecha).

Para las imágenes que cuentan con banda pancromática, Landsat 8 y Pléiades, los compuestos RGB se generan empleando un algoritmo de Pansharpening que produce una imagen de fusión en color de máxima resolución espacial, conforme a las características de su banda pancromática (15 m en el caso de Landsat8 y 50 cm en el caso de Pléiades). Estas imágenes son óptimas para la fotointerpretación y el seguimiento de las explotaciones agrícolas por parte de los regantes.

- Generación del NDVI, a partir de las imágenes en valores de reflectividad TOA, y de los parámetros K_{cb} y K_c , aplicando la fórmula de Calera et al, 2014, explicada anteriormente a la resolución espacial original de las bandas multiespectrales de cada sensor.
- Carga de imágenes y productos derivados en el servicio web de imágenes.
- Obtención de las curvas de K_c por cultivo para cada unidad de riego y análisis de resultados. Contraste de los valores del K_c derivado de teledetección y análisis de la evolución del NDVI- K_c a partir de los datos de referencia disponibles, detección de anomalías, estudio de heterogeneidades, etcétera.

La Figura 2 muestra un flujograma con el protocolo de análisis de imágenes y productos de teledetección obtenidos.

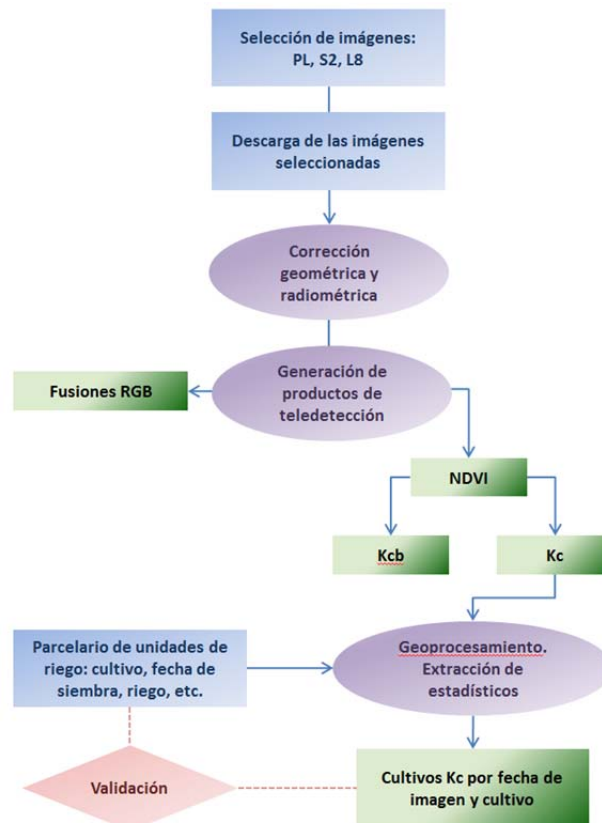


Figura 2: Protocolo de análisis de imágenes y generación de productos de valor añadido

3) Resultados y discusión

3.1 Resultados y comparativa de coeficiente de cultivo

El método de cálculo del coeficiente de cultivo más extendido es el de FAO56 (Allen et al 1998). En éste se fijan tres valores de K_c para las cuatro fases de desarrollo del cultivo: inicial (desde la siembra al 10% de suelo sombreado), desarrollo (hasta el 70-80% de suelo sombreado), media (hasta el comienzo de la senescencia de las hojas) y final (hasta la maduración o recolección). Estos valores se fijan en función de cada cultivo, considerando la duración de cada etapa de crecimiento y la fecha de siembra.

El problema principal del método FAO es determinar correctamente la duración de las distintas fases de cultivo (condicionada por las variedades y las condiciones climáticas de cada región) y el K_c que le corresponde a cada etapa.

La tabla adjunta describe las fechas de siembra y recolección de los principales cultivos de la zona, facilitados por las comunidades de regantes del Porma implicadas.

Tabla 2: Fechas de siembra y recogida de los cultivos principales.

GRUPOS DE CULTIVOS	SIEMBRA	RECOGIDA
Cereal	Noviembre	Junio-julio
Girasol	Mayo-junio	Septiembre
Maíz	Abril-mayo	Octubre
Remolacha	Abril	Octubre

A partir de estas fechas se elaboró la curva K_c según FAO 56 (Allen et al, 1998), atendiendo a la duración de las etapas de crecimiento establecidas en dicha publicación.

Por otro lado, se han obtenido las curvas K_c derivadas por teledetección. Observándose que los valores del K_c derivados de las imágenes, a lo largo del periodo de desarrollo de los cultivos, reproducen con mayor fidelidad la evolución de éste a lo largo de su ciclo fenológico.

En la figura 3A a 3D están representadas las curvas del K_c obtenidos por los dos métodos anteriormente citados, FAO y teledetección.

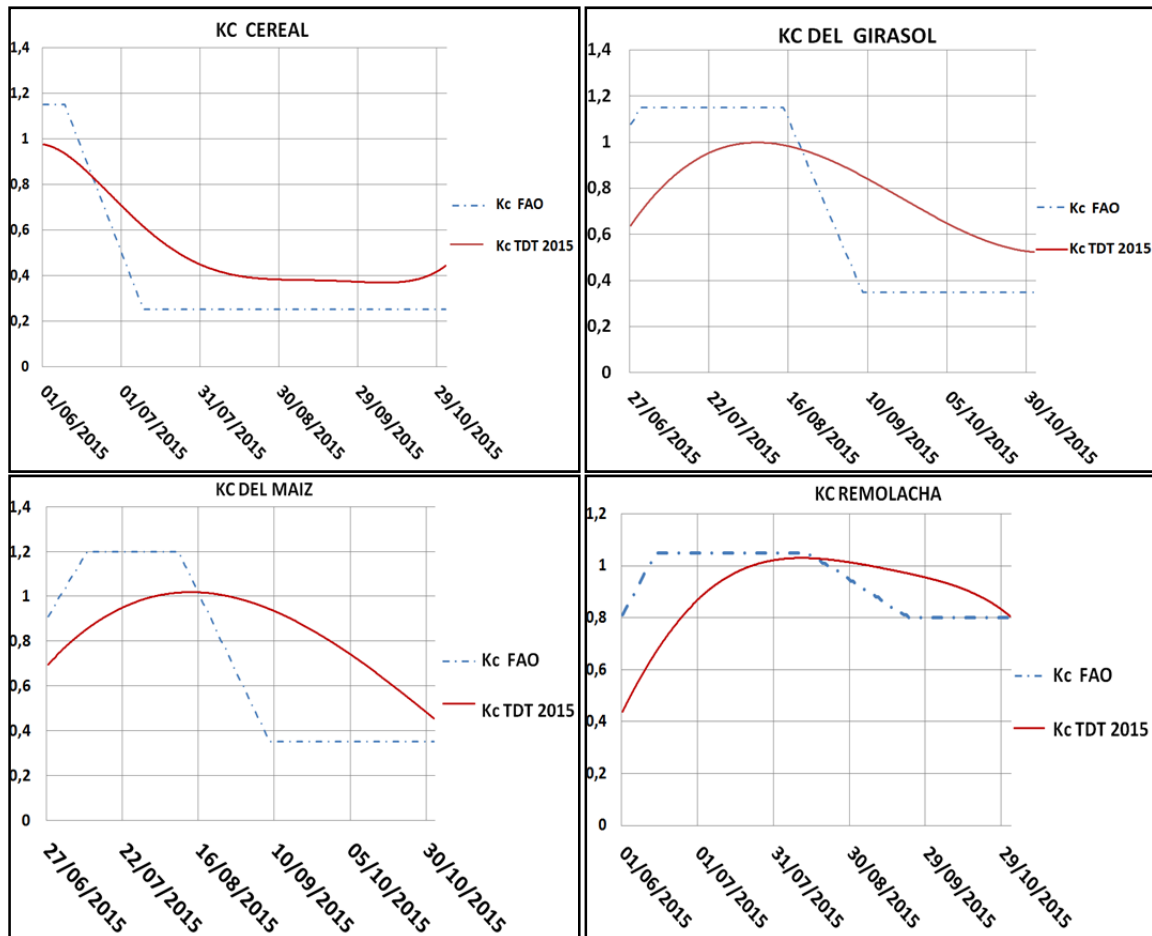


Figura 3: Comparativa de las curvas del K_c obtenida por teledetección y curva FAO para cereal (A), girasol (B), maíz (C) y remolacha (D).

- Cereal. Los datos suministrados por la comunidad de regantes solo incluyen datos a partir de mediados de julio, con dos poblaciones, una con valores de K_c muy altos (próximos a 1) y otra con valores muy bajos (próximos a 0,25). Los valores de K_c derivados de las imágenes de satélite presentan una evolución acorde con el ciclo fenológico de los cereales de invierno, presentando valores máximos desde principio de abril a principio de junio, coincidiendo con la fase de máximo desarrollo. Los valores a partir de julio corresponderían al cultivo ya cosechado.
- Cultivos de verano: girasol, maíz y remolacha. La evolución del K_c derivado de las imágenes de satélite es congruente con su ciclo fenológico y con los valores de K_c de referencia para las fases de desarrollo y máxima cobertura. Aunque la teledetección

presenta valores máximos más bajos que la curva FAO, y ligeramente desplazados en el tiempo.

En líneas generales, la evolución del K_c derivado de las imágenes de satélite es congruente con los valores de K_c de referencia para las fases de desarrollo y máxima cobertura. En la fase de maduración y recolección, los valores de K_c derivado de las imágenes reflejan con mayor fidelidad la verdadera evolución del cultivo. Como era de esperar, los mayores desajustes se observan en la fase inicial, cuando no existe una cobertura completa del suelo por el cultivo (limitación del método aplicado).

3.2 Cálculo de las necesidades hídricas a partir de los valores de K_c de teledetección y evaluación de resultados

Se compararon los valores de la Evapotranspiración del cultivo (ET_c) calculados a partir de la K_c de FAO con los calculados a partir de la K_c de teledetección, para los distintos cultivos, aplicando la fórmula de cálculo de la ET_c :

$$ET_c = ET_o * K_c$$

La comparativa de las ET_c acumuladas calculadas para los periodos vegetativos de los cultivos se recoge en el siguiente cuadro:

Tabla 4. Comparativa de las ET_c acumuladas

	27 de Junio a 31 de Octubre	1 de Junio a 31 de Octubre	1 de Junio a 15 de Julio	27 de Junio a 1os Septiembre
	Maíz	Remolacha	Cereal	Girasol
ET_c (K_c FAO) mm	369	586	171	359
ET_c (K_c tdt) mm	391	525	190	340
Diferencia ET_c mm	22	-61	19	-19

A partir de los datos de ET_c y de datos meteorológicos y de campo, se calculan las necesidades brutas de agua por cultivo, a través de la fórmula siguiente:

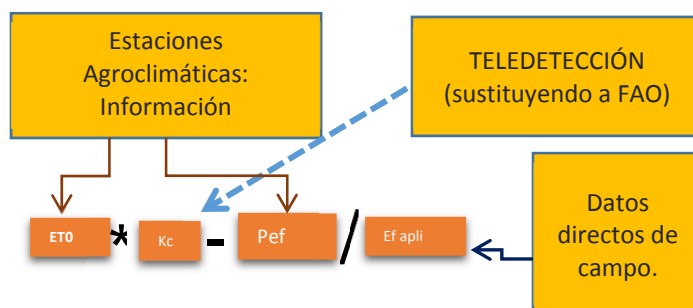


Figura 4: Fórmula de cálculo para las necesidades hídricas brutas y origen de los datos

En las tablas sucesivas se muestran los valores mensuales para cada cultivo estudiado:

Tabla 5. Cálculo de las necesidades brutas mensuales del maíz (sobre 18 parcelas)

	NNHHb FAO (mm)	NNHHb Teledetección (mm)	Diferencia (ahorro) mm
Junio	26	21	-5
Julio	146	138	-8
Agosto	138	122	-16
Septiembre	49	76	27
Octubre	15	29	14

El cálculo anual es similar por ambos métodos, pero las diferencias más importantes radican en la distribución de las necesidades hídricas mensualmente: menos dotación o riegos más espaciados entre junio y agosto y más dotación o riegos menos espaciados a partir septiembre.

Tabla 6. Cálculo de las necesidades brutas mensuales de la remolacha (sobre 9 parcelas)

	NNHHb FAO (mm)	NNHHb Teledetección (mm)	Diferencia (ahorro) mm
Junio	119	85	-34
Julio	181	165	-16
Agosto	143	133	-10
Septiembre	82	96	14
Octubre	39	41	2

En el caso de la remolacha se necesitaría menos dotación en los meses de verano (junio a agosto) y algo más de dotación o riegos menos espaciados en el mes de septiembre.

Tabla 7. Cálculo de las necesidades brutas mensuales del cereal (sobre 13 parcelas)

	NNHHb FAO (mm)	NNHHb Teledetección (mm)	Diferencia (ahorro) mm
Junio	60	62	2
Julio	48	49	1

En el caso del cereal tanto el cálculo anual como el de distribución mensual son valores muy similares. No obstante, hay que tener en cuenta que los cálculos disponibles son desde junio, que es la fase final del ciclo de cultivo, quedando sin calcular el periodo de máximo desarrollo vegetativo, por tanto se debería hacer el cálculo de fechas anteriores.

Tabla 8. Cálculo de las necesidades brutas mensuales del girasol (sobre 2 parcelas)

	NNHHb FAO (mm)	NNHHb Teledetección (mm)	Diferencia (ahorro) mm
Junio	27	20	-7
Julio	134	111	-23
Agosto	139	134	-5
Septiembre	36	67	31
Octubre	16	28	12

Las cantidades obtenidas en los cálculos de necesidades hídricas anuales son muy similares. La diferencia radica en la distribución de los riegos: habría que aplicar menos dotación en los meses de junio y julio, pero se debe incrementar en septiembre y octubre.

4) Conclusiones y recomendaciones

- Los resultados obtenidos hasta la fecha corroboran la hipótesis de partida de que a partir de los datos de teledetección es posible generar unas curvas de K_c más ajustada que las de FAO para los cultivos principales de la zona: maíz, remolacha, cereal y girasol
- Pese a la diversidad de sensores utilizados, la coherencia y similitud de los valores del K_c , derivados de las imágenes de satélite, muestran la consistencia de los datos de teledetección, fruto de un procesado robusto y fiable.
- La metodología de cálculo de K_c (Calera et al, 2014) arroja resultados consistentes para los cultivos analizados, aunque sería interesante profundizar en el estudio haciendo un análisis más detallado, con mayor número de parcelas de campo y con datos de primavera para el cereal.
- Las necesidades hídricas calculadas con este coeficiente de cultivo ajustado se pretenden utilizar como información de referencia, de manera que permitan mejorar la eficiencia hídrica, no sólo en la cantidad de agua, sino también en el momento adecuado para regar.
- En el análisis de las necesidades hídricas brutas, en principio no se obtienen diferencias significativas en cuanto a ahorro de agua (salvo en la remolacha) pero sí en cuanto a la distribución mensual de los riegos. Podría considerarse regar con menos frecuencia en los meses de junio a agosto, e incrementarse en septiembre. Esto podría repercutir tanto en un aumento de la productividad como en ahorro energético. Ambos aspectos pendientes de valoración.

5) Bibliografía.

Allen, R., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. 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.

Calera, A., Campos, I., Garrido, J., 2014. Determinación de las necesidades de agua y de riego mediante estaciones meteorológicas y series temporales de imágenes multiespectrales. Jornada técnica de innovación en gestión del regadío mediante redes agroclimáticas, teledetección y sistemas de información. CENTER, MAGRAMA.

Calera, A., Garrido, J., 2016. Un uso más eficiente del agua integrando Red SIAR, teledetección y SIG. Proyecto SPIDER-CENTER. CENTER, MAGRAMA.

Torres, E., 2010. El modelo FAO-56 asistido por satélite en la estimación de la evapotranspiración en un cultivo bajo estrés hídrico y suelo desnudo. Caso de estudio: Acuífero Mancha Oriental, España. Tesis Doctoral. Universidad de Castilla-La Mancha.

Wright, J.L., 1982. New Evapotranspiration Crop Coefficients. *Journal of the Irrigation and Drainage Division* 108, 57-74.