

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

Alfonso Calera, Isidro Campos y Jesús Garrido-Rubio
Sección de Teledetección y SIG. Universidad de Castilla La Mancha.
Alfonso.Calera@uclm.es

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	2
2. DETERMINACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS: METODOLOGÍA K_c-ET_0 BASADA EN TELEDETECCIÓN	2
2.1 <i>El coeficiente de cultivo basal K_{cb} desde imágenes multiespectrales: El modelo FAO56 basado en Teledetección</i>	4
2.2 <i>Relación entre el coeficiente de cultivo basal K_{cb} y el índice de vegetación NDVI</i>	4
2.3 <i>Necesidades de agua y necesidades de riego. Determinación directa de la transpiración de una cubierta</i>	5
3. DISPONIBILIDAD DE IMÁGENES DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN. EL SISTEMA WEBSIG SPIDER	6
4. APLICACIÓN A CULTIVOS HERBÁCEOS	7
4.1 <i>Relación entre el coeficiente de cultivo único K_c y el índice de vegetación NDVI</i>	8
4.2 <i>Aplicación operativa a las necesidades de agua de riego en cultivos herbáceos</i>	9
5. APLICACIÓN A LA VIÑA Y CULTIVOS LEÑOSOS	10
5.1 <i>Necesidades de agua de la viña y necesidades de riego</i>	11
5.2 <i>Variabilidad de la cubierta de la viña y de las necesidades de agua</i>	15
ANEXO I. BALANCE DE AGUA EN EL SUELO Y DEFINICIÓN DEL COEFICIENTE DE ESTRÉS HÍDRICO	17
BIBLIOGRAFÍA SELECCIONADA	19

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

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

En este documento¹ se considera la estimación de las necesidades de agua y de riego mediante secuencias temporales de imágenes multiespectrales de satélite y estaciones meteorológicas; se describe también el procedimiento para estimar las necesidades de agua y riego mediante la integración de las series de imágenes en el modelo FAO56. Dadas las diferentes características de cultivo y manejo, se analiza la aplicación del procedimiento descrito por separado a cultivos herbáceos y leñosos, y dentro de estos últimos específicamente a la viña, y se discute su aplicabilidad. Así pues el documento se estructura con una parte metodológica general a todo tipo de cultivos y cubiertas, y una parte específica para cultivos herbáceos y para cultivos leñosos donde se describen aproximaciones operativas.

2. DETERMINACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS: METODOLOGÍA K_c - ET_0 BASADA EN TELEDETECCIÓN

Una metodología ampliamente utilizada y comúnmente aceptada para la estimación de las necesidades de agua de la cubierta vegetal, que vienen determinadas por la evapotranspiración ET, es aquella denominada Coeficiente de cultivo-Evapotranspiración de referencia K_c - ET_0 , que se describe de forma detallada en el manual de FAO56 (Allen et al., 1998).

El procedimiento K_c - ET_0 considera que la ET es el producto de dos factores, el primero de ellos la demanda evaporativa de la atmósfera o evapotranspiración de referencia, ET_0 , en la que se engloban parámetros meteorológicos como la radiación, la velocidad del viento y la sequedad del aire, y el segundo, un coeficiente de cultivo, que indica el estado de desarrollo de la cubierta frente a aquella que se considera patrón o de referencia, en FAO56 una gramínea como la festuca.

La formulación más avanzada del procedimiento FAO56 incorpora al tradicional uso de coeficiente de cultivo “único” K_c el denominado coeficiente de cultivo “dual” (Wright, 1982), el cual permite acercarnos a la estimación de la evapotranspiración como suma por un lado de la transpiración, o flujo de agua a través de la planta, y por

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

otro de la evaporación desde la fracción de suelo desnuda. Para ello se introduce el coeficiente de cultivo basal, K_{cb} , como el cociente entre la transpiración de una cubierta en ausencia de estrés y la evapotranspiración de referencia, así como un coeficiente evaporativo, K_e , que recoge la evaporación desde el suelo desnudo.

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

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

donde:

ET: evapotranspiración del cultivo

ET_o: evapotranspiración de referencia

K_c: coeficiente de cultivo "único"

K_{cb}: coeficiente de cultivo basal o coeficiente de transpiración

K_{cb} · ET_o es la componente de la transpiración en ausencia de estrés

K_e: coeficiente evaporativo

K_e · ET_o es la componente de evaporación desde el suelo

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

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

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

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

- 4) $ET = K_s K_c ET_o$

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

denominadas de riego deficitario controlado, en las que se aplica la cantidad de agua precisa que permite un manejo del cultivo bajo un determinado estrés sin merma apreciable en la producción.

2.1 El coeficiente de cultivo basal K_{cb} desde imágenes multiespectrales: El modelo FAO56 basado en Teledetección

Para obtener el valor de ET_o se dispone en España de una red de estaciones agroclimáticas que permiten conocer de manera precisa y en tiempo real su valor diario, calculado a partir de datos meteorológicos medidos en la zona y públicamente disponibles mediante el Sistema de información Agroclimática para el Regadío (SIAR), <http://portal.magrama.gob.es/websiar/Inicio.aspx>.

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

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

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

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

2.2 Relación entre el coeficiente de cultivo basal K_{cb} y el índice de vegetación NDVI

La abundante literatura científica desde Heilman et al., (1982) Neale et al., (1987), pone de manifiesto la buena relación lineal existente entre el coeficiente de cultivo basal de una cubierta, análogo a un coeficiente de transpiración, y los índices de vegetación, como el Índice de Vegetación por Diferencias Normalizado, NDVI, así como con otros índices como el SAVI. Desde trabajos teóricos (Chodhoury et al., 1994), a experimentales (Gonzalez-Dugo et al. 2009) esta relación se ha analizado para una amplia gama de cultivos y vegetación natural (Glen et al., 2011).

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

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

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

donde:

K_{cb} : coeficiente de cultivo basal, con valores que oscilan entre 0.15 y 1.15
NDVI: Índice de Vegetación por Diferencias Normalizado, obtenido desde imágenes multiespectrales corregidas atmosféricamente y normalizado a las bandas espectrales LandsatETM+; sus valores oscilan entre aproximadamente 0.14 (suelo desnudo) y 0.91 (cubiertas verdes muy densas)

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

2.3 Necesidades de agua y necesidades de riego. Determinación directa de la transpiración de una cubierta

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

El producto del coeficiente de cultivo basal derivado de las imágenes multiespectrales y la ET_0 obtenida desde estaciones de la red SIAR, permite estimar directamente la transpiración máxima actual que la cubierta puede alcanzar bajo las condiciones de demanda evaporativa indicadas por la ET_0 . El conocimiento de esta

transpiración máxima, que no requiere de ningún dato adicional a las imágenes y a las estaciones meteorológicas, puede revestir un gran valor para muchas aplicaciones.

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

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

3. DISPONIBILIDAD DE IMÁGENES DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN. EL SISTEMA WEBGIS SPIDER

El acceso a las series temporales de índices de vegetación (IV) es, obviamente, necesario para la aplicación de la metodología aquí descrita. Dichas series temporales tienen que ser lo suficientemente densas, esto es la frecuencia de imágenes suficiente, para describir adecuadamente la evolución temporal de la cubierta vegetal, como se puede observar en la Figura 1.

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

En la actualidad existen suficientes sensores actualmente en órbita para conseguir una frecuencia de imágenes semanal con resolución espacial entre 5 y 30m, suficiente para la mayor parte de las aplicaciones en agricultura. Sin embargo la

adquisición de estas imágenes tiene un coste difícilmente asumible por usuarios particulares. En este aspecto se ha producido un cambio sustancial pues la agencia espacial estadounidense NASA ha adoptado la política de poner libre y gratuitamente a disposición de los usuarios los datos adquiridos por la serie Landsat, ya ortorectificados. Esta decisión se fundamenta en que operando de esta manera se retorna la inversión pública a la sociedad en forma de aplicaciones, que generan a su vez riqueza (Forney et al., 2012; Miller et al., 2011; Serbina and Holly, 2014).

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

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

A través del CENTER, un proyecto del MAGRAMA denominado SPIDER-CENTER, permite el acceso libre a la secuencia de imágenes multispectrales adquiridas principalmente por Landsat 8 y correspondientes a los años 2014 y 2015 en el ámbito espacial de la España peninsular. Así, un conjunto de productos básicos y avanzados entre los que destacamos secuencias temporales de imágenes NDVI y K_{cb} compuestas de aproximadamente 1000 imágenes en estos dos años, se encuentran disponibles para todos aquellos usuarios que deseen explotarlas. Además, se han incorporado tras su procesado y normalización series de imágenes Spot5 correspondientes a sitios seleccionados. Todas estas series de imágenes y productos derivados se pueden acceder a través del sistema SPIDERwebGIS® (<http://zeus.idr-ab.uclm.es/publico/webgis/>). También se puede acceder desde la propia web del CENTER (<http://www.center.es/>). El sistema permite visualizar la secuencia temporal imágenes y consultar la evolución temporal de los índices de vegetación de parcelas individuales, y por tanto de los coeficientes de cultivo. Detalles acerca del uso del sistema, así como de los productos accesibles, se encuentran en el documento “*Acceso a secuencias temporales de imágenes de satélite 2014 - 2015 en la España peninsular. Proyecto SPIDER-CENTER*”.

4. APLICACIÓN A CULTIVOS HERBÁCEOS

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

La Figura 1 describe la evolución de una cubierta de trigo de regadío mediante los valores del NDVI obtenidos de una serie temporal de imágenes de satélite, concretamente de la empresa española DEIMOS. En ella se indican las diferentes fases del ciclo de crecimiento, separadas por líneas discontinuas, así como algunas fases fenológicas relevantes tales como la aparición de la hoja bandera y el punto en que el grano alcanza la madurez fisiológica. Esta curva corresponde a un trigo cuya producción se situó alrededor de los 10.000 kg/ha, siendo pues cercana a la curva “ideal”. Otra característica general a otros muchos cultivos, que la propia figura señala, es la suavidad con que la cubierta evoluciona a lo largo de su ciclo de crecimiento.

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

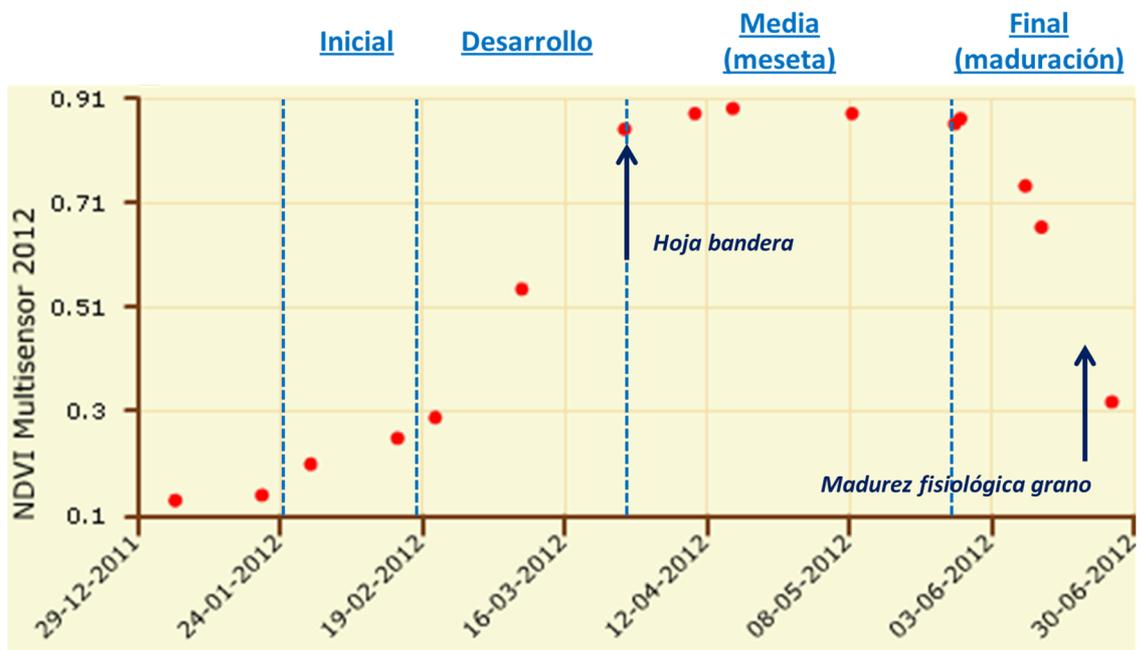


Figura 1. Evolución de una cubierta de trigo de regadío para el año 2012, descrita mediante el índice de vegetación obtenido desde una serie temporal de imágenes DEIMOS1. En la figura se muestran superpuestas las fases del ciclo de crecimiento separadas por líneas discontinuas y también algunas fases fenológicas relevantes.

4.1 Relación entre el coeficiente de cultivo único K_c y el índice de vegetación NDVI

En cultivos herbáceos se utiliza ampliamente el coeficiente de cultivo único K_c . Desde las imágenes multiespectrales se obtiene directamente el coeficiente de cultivo basal, por lo que para obtener el coeficiente de cultivo único K_c se ha de promediar la componente evaporativa de la fracción de suelo desnudo. Esta componente evaporativa es altamente dependiente de la superficie efectivamente mojada, esto es del sistema de

riego y de la frecuencia, además del sombreado efectivo que la cubierta establezca sobre este suelo y de las propias características del suelo.

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

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

Limitaciones de uso de la ecuación (6)

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

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

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

4.2 Aproximación operativa a las necesidades de agua de riego en cultivos herbáceos

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

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

donde:

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

ET : evapotranspiración de la cubierta

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

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

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

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

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

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

5. APLICACIÓN A LA VIÑA Y CULTIVOS LEÑOSOS

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

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

2009). Por ello la descripción que sigue se centra en el caso de la viña, aunque las relaciones y conceptos se pueden extender y utilizar en otros cultivos leñosos.

La Figura 2 muestra la evolución del NDVI para dos puntos de una parcela de viña de tempranillo en espaldera en regadío. En ella se muestra el patrón temporal típico de la evolución de la viña en la zona de La Mancha, así como son evidentes las diferencias espaciales de vigor en una misma parcela.

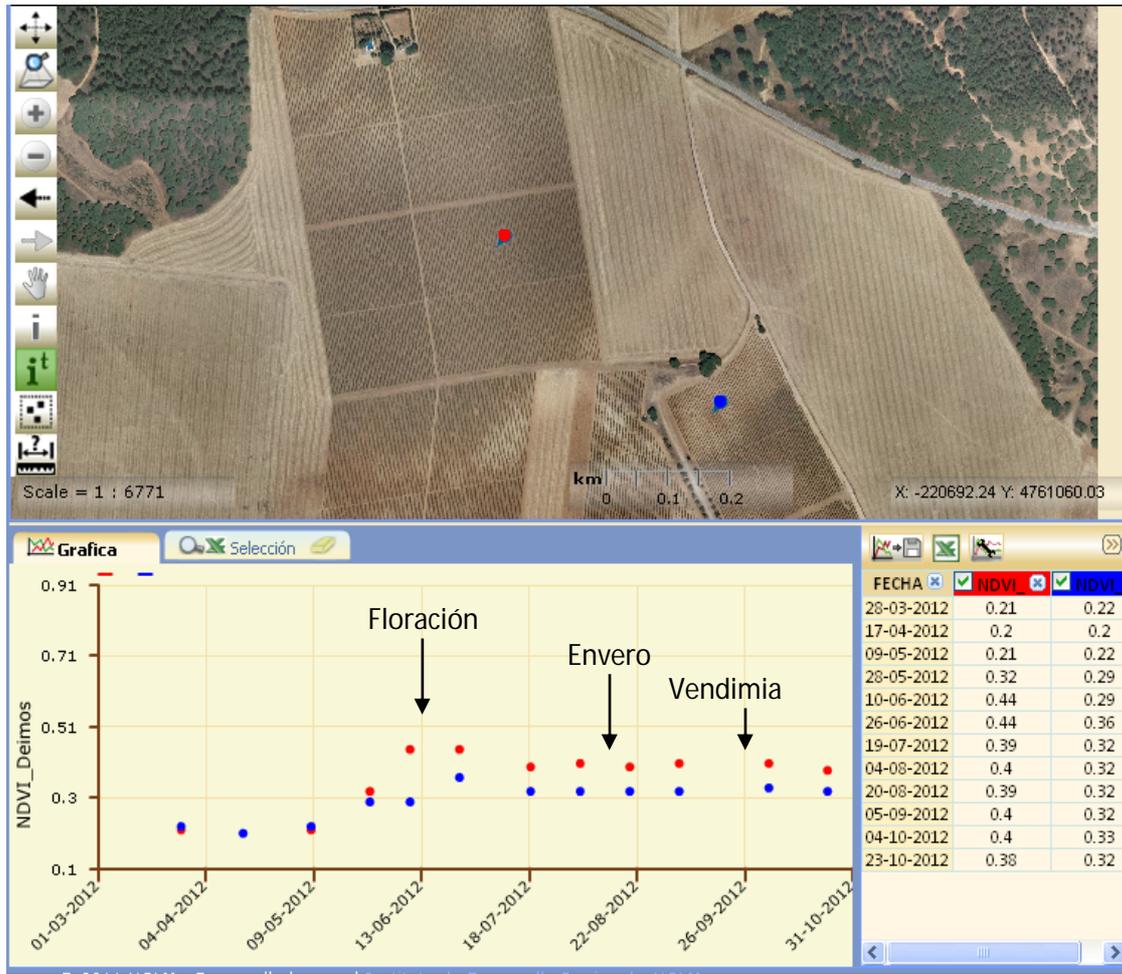


Figura 2. Evolución de la cubierta vegetal en dos puntos de una viña en espaldera representativa de la zona Mancha, para el año 2012, descrita mediante el índice de vegetación obtenido desde una secuencia de imágenes de satélite DEIMOS1. Los valores son el promedio agregado sobre una superficie de una ha centrada en el punto de muestreo. En la figura la viña se muestra sobre una ortofotografía de 0,5 m de resolución espacial, en la que se indican las zonas muestreadas.

5.1 Necesidades de agua de la viña y necesidades de riego

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

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

Como ejemplo se presenta la estimación de las necesidades netas de riego en ausencia de precipitación para las viñas cuya evolución se indica en la Figura 1. Como se puede observar en dicha figura, a partir de la floración, la arquitectura de las viñas se mantiene constante con un valor de NDVI de, aproximadamente, 0.4 y 0.32, respectivamente, lo que aplicando la ecuación (4) conduce a valores de coeficiente de cultivo basal dados por $K_{cb1} = 0.4 \times 1.44 - 0.1 = 0.48$ y $K_{cb2} = 0.32 \times 1.44 - 0.1 = 0.36$, respectivamente.

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

Si asumimos un riego deficitario del 70%, las necesidades netas de riego serán $0.7 \times 3.12 = 2.2$ mm/día, y $0.7 \times 2.34 = 1.64$ mm/día, respectivamente. Estas necesidades netas de agua de riego se refieren a cantidades de agua puestas en suelo donde pueden ser tomadas por las raíces. Para calcular las necesidades brutas es necesario tener en cuenta la eficiencia y uniformidad del sistema de riego, incluyendo la evaporación desde la superficie del suelo, lo que a su vez depende de la superficie de la zona mojada y frecuencia de riego. Para un sistema de goteo usual y un riego semanal, el componente evaporativo K_e puede estimarse alrededor de 0.05. El coeficiente de cultivo para las dos viñas consideradas para el período en que la arquitectura de la cubierta está bien establecida sería de acuerdo con la ecuación (2): $K_{c1} = K_{cb1} + K_e = 0.48 + 0.05 = 0.53$ y $K_{c2} = K_{cb2} + K_e = 0.32 + 0.05 = 0.37$. Así pues, las necesidades brutas de riego, considerando una alta uniformidad del sistema de riego serían 2.53 mm/día y 1.94 mm/día, respectivamente. En caso de ocurrir precipitación, las necesidades de agua de riego han de minorarse en la precipitación efectiva.

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

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

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

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

El modelo presentado ha sido validado frente a datos medidos durante sucesivas campañas de campo en viñedos en La Mancha (Campos et al., 2010a; Campos et al., 2010b) y del sur de Italia (Consoli and Barbagallo, 2012). La Figura 2.a muestra la comparación de los valores simulados de evapotranspiración frente a valores medidos por una estación de covarianza de torbellinos en un cultivo de viñedo en regadío manejado mediante sistema de espaldera vertical y con una densidad de plantación de 2200 plantas/ha. En la Figura 2.b se presentan los datos experimentales obtenidos en un viñedo en régimen de secano, manejado mediante el sistema tradicional de viña en vaso y con una densidad de plantación de 1100 plantas/ha. El acuerdo general obtenido indica que el modelo permite reproducir la evapotranspiración del viñedo con una precisión superior a 0.5 mm/día.

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

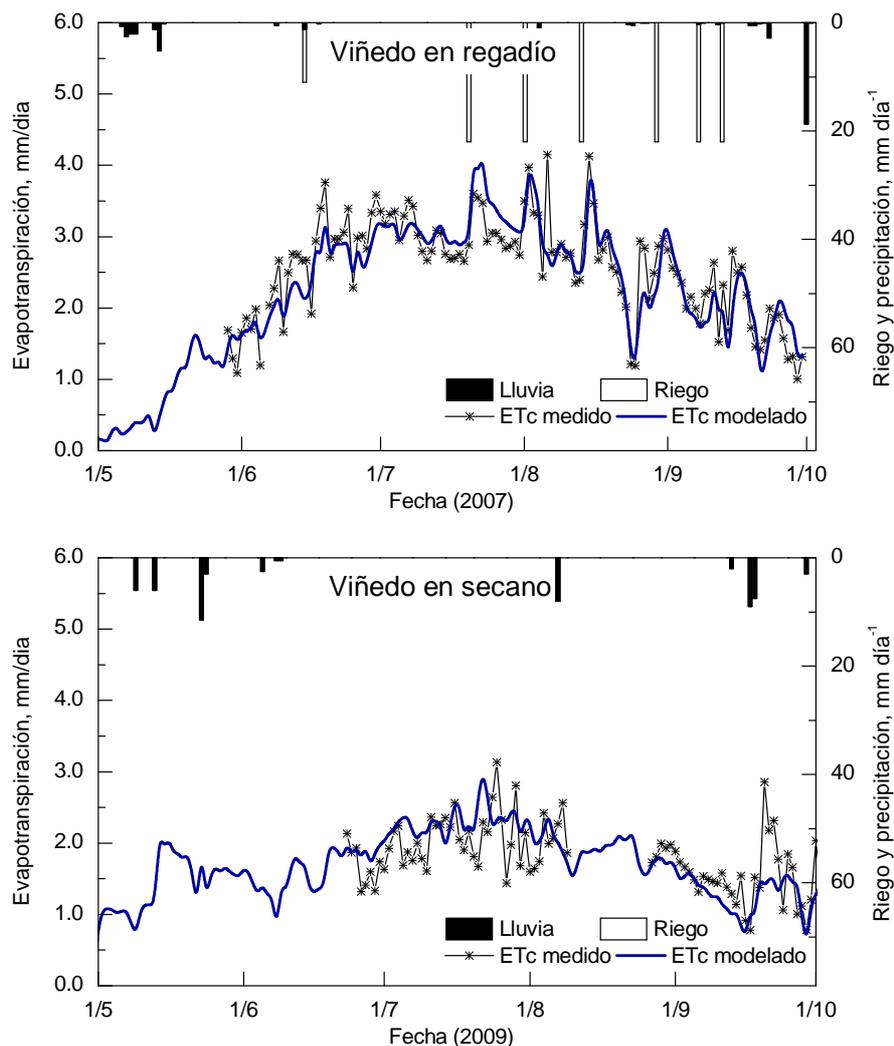


Figura 2. Comparación de los valores medidos y modelados de evapotranspiración para un cultivo de viñedo en regadío (año 2007), caso a, y viñedo en seco (año 2009), caso b. Adaptado de (Campos et al., 2010b) y (Campos et al., 2010a).

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

Un campo emergente que no se detalla aquí es el basado en imágenes de muy alta resolución espacial que permiten captar señales de temperatura, reflectividad y

fluorescencia correspondientes específicamente a las plantas, lo que abre la puerta a la determinación del estatus hídrico de la vegetación basado en este tipo de imágenes.

5.2 Variabilidad de la cubierta de la viña y de las necesidades de agua

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

Las imágenes de índices de vegetación recogen el vigor de la vegetación, su evolución temporal y su distribución espacial, permitiendo cuantificar las diferencias dentro de una parcela o con otras parcelas. La Figura 3 muestra la evolución temporal en promedio del coeficiente de cultivo basal para la viña de regadío en el área de La Mancha Oriental, cerca de unas 21000 ha, previamente identificada. En dicha Figura 3 puede apreciarse la dispersión de valores de K_{cb} , indicada por los histogramas representados que permiten cuantificar la variabilidad en el valor de este parámetro en el ámbito espacial estudiado.

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

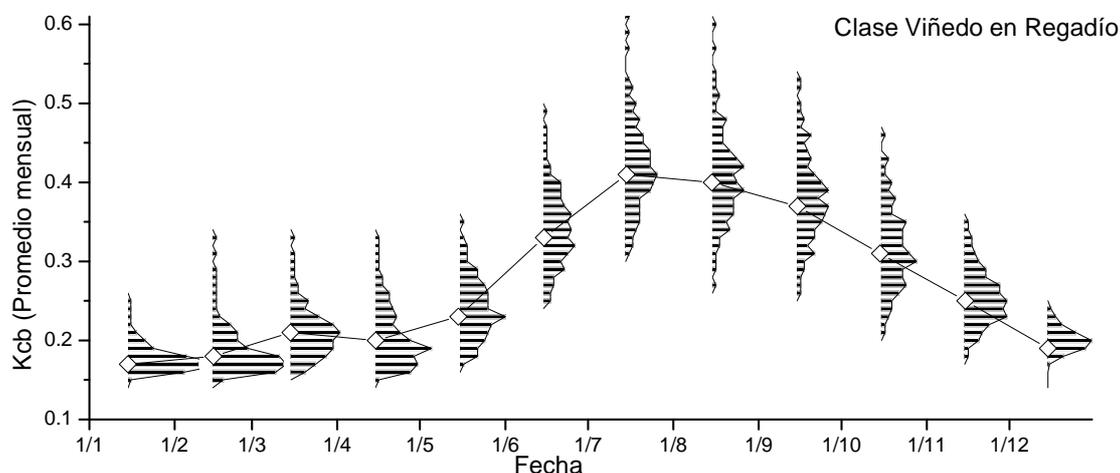


Figura 3. Evolución mensual del coeficiente K_{cb} promedio (\diamond) y diagramas mensuales de frecuencias de los valores obtenidos en toda la superficie estudiada durante el año 2009.

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

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

Agradecimientos

Los resultados presentados en este trabajo han sido obtenidos en el marco de proyectos orientados al desarrollo y validación de las metodologías. Entre estos proyectos destacamos CERES (Acoplamiento de los modelos de balance de agua y balance de energía mediante teledetección para el seguimiento de la evapotranspiración, humedad en suelo y estrés hídrico, contrato AGL2011-30498-C02-01, Ministerio de Ciencia e Innovación), EBHE (Evapotranspiración, balance hídrico y estrés, contrato CGL2008-04047, Ministerio de Ciencia e Innovación), SIRIUS Sustainable Irrigation water management and River-basin governance: Implementing User-driven Services (FP7-SPACE-2010-1) y SPIDER-CENTER (Trabajos de estudio de innovación para un uso más eficiente del agua en el regadío mediante herramientas basadas en la Red SIAR, la Teledetección y SIG, TSA0054103).

ANEXO I. BALANCE DE AGUA EN EL SUELO Y DEFINICIÓN DEL COEFICIENTE DE ESTRÉS HÍDRICO

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

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

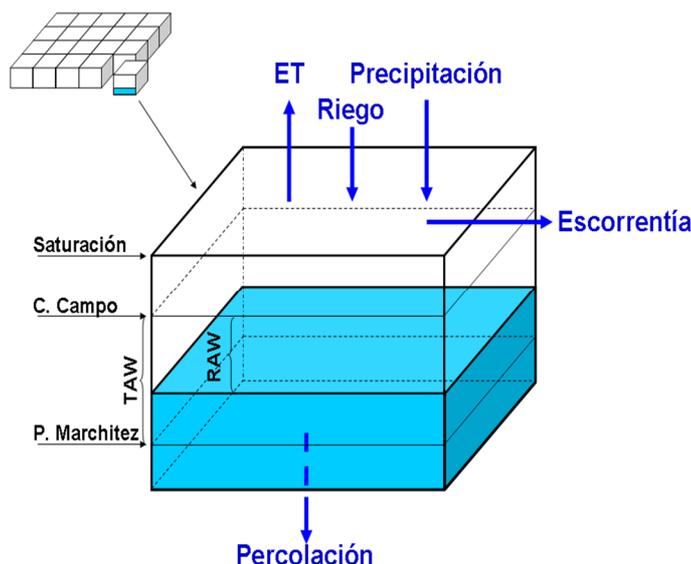


Figura A.1.- Componentes principales del balance de agua en el estrato de suelo explorado por las raíces

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

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

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

BIBLIOGRAFÍA SELECCIONADA

- 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(1): 8-18.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Howell, T.A. and Jensen, M.E., 2011. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, 98: 899–920.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. *Irrigation and Drainage Paper No. 56*, FAO, Rome, Italy.
- Calera, A., Garrido-Rubio, J., Saiz, J. and Sánchez, J., 2009. Interpolación normalizada de imágenes procedentes de múltiples sensores, Sección de Teledetección y SIG. IDR-Albacete (UCLM). Albacete.
- Calera, A.; A. Jochum ; A. Cuesta, A. Montoso, J. González (2005). Irrigation management from space: Towards user-friendly products. *Irrigation and Drainage Systems* 19:337-353. Springer
- Campos, I. et al., 2010a. Basal crop coefficient from remote sensing assessment in rain-fed grapes in southeast Spain, *Remote sensing and hydrology*. IAHS, Jackson Hole (WY). USA, pp. 397-400.
- Campos, I., Neale, C.M.U., Calera, A., Balbontin, C. and González-Piqueras, J., 2010b. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agricultural Water Management*, 98: 45-54.
- Consoli, S. and Barbagallo, S., 2012. Estimating Water Requirements of an Irrigated Mediterranean Vineyard Using a Satellite-Based Approach. *Irrig Sci*, 138(10): 896-904.
- Cuesta, A., Montoro, A., Jochum, A.M., López, P. and Calera, A., 2005. Metodología operativa para la obtención del coeficiente de cultivo desde imágenes de satélite. *ITEA : Información Técnica Económica Agraria*, 101(3): 212-224.
- Forney, W.M., Raunikar, R.P., Bernknopf, R.L. and Mishra, S.K., 2012. An economic value of remote-sensing information -- Application to agricultural production and maintaining groundwater quality. *Professional Paper* 1796: 60.
- Garrido-Rubio, J., Campos, I., Villa, G., Plaza, N. and Calera, A., 2011. INTERPOLA. Herramienta para la generación de imágenes sintéticas y sustitución de valores reales con presencia de nubes-sombras por valores interpolados, XIV Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Mieres, Asturias, Spain, pp. 4.
- Gonzalez-Dugo, MP; Neale, CMU; Mateos, L.; Kustas, WP.; Prueger, JH; Anderso MC; Li F. 2009. A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149; 1843-1853.
- 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*, 25: 4050-4062.

- Heilman, J.L., Heilman, W.E. and Moore, D.G., 1982. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. *Agronomy Journal*, 74: 967-971.
- Martínez-Casasnovas, J.A., Agelet-Fernández, J., Arnó, J. and Ramos, M.C., 2012. Analysis of vineyard differential management zones and relation to vine development, grape maturity and quality. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 10(2): 326-337.
- Martínez, C., 2014. Observación multispectral de la cubierta vegetal mediante Teledetección. Aplicación a Castilla-La Mancha, UCLM (Universidad de Castilla-La Mancha), Albacete.
- Miller, H.M., Sexton, N.R., Koontz, L., Loomis, John, Koontz, S.R. and Hermans, C., 2011. The users, uses, and value of Landsat and other moderate-resolution satellite imagery in the United States. Executive report. Open-File Report 2011-1031: 43.
- Neale, C.M.U., 1987. Development of Reflectance-based crop coefficients for corn. Ph. Dissertation. Colorado State University. Fort Collins.
- Neale, C.M.U., Bausch, W.C. and Heermann, D.F., 1989. Development of reflectance-based crop coefficients for corn. *Trans Am. Soc. Agr. Eng.* 32:1891-1899.
- Serbina, L. and Holly, M.M., 2014. Landsat and Water — Case Studies of the Uses and Benefits of Landsat Imagery in Water Resources. (Open - File Report 2014-1108): 61.
- Torres, E. and Calera, A.; 2010. Bare Soil Evaporation under High Evaporation Demand. A modification proposed to FAO-56 model. *Hydrological Sciences Journal*, 55: 3, 303 — 315 URL: <http://dx.doi.org/10.1080/02626661003683249>
- Van Leeuwen, C. et al., 2009. Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? *International journal of vine and wine sciences*, 43(3): 121-134.
- Villa, G. et al., 2012. Spectro-temporal reflectance surfaces: a new conceptual framework for the integration of remote-sensing data from multiple different sensors. *International Journal of Remote Sensing*, 34(9-10): 3699-3715.
- Williams, L.E. and Ayars, J.E., 2005. Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132: 201-211.
- Wright, J.L., 1982. New Evapotranspiration Crop Coefficients. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108: 57-74.