

D-06-2023

Comunicación científico-técnica

Análisis del uso de la evapotranspiración real calculada con Landsat y de las predicciones climáticas para la programación del riego en cultivos frutales.

Analysis of the use of actual evapotranspiration calculated with Landsat and climate forecasts for irrigation scheduling in fruit crops.

Autores: Jiménez-Bello, M.A. ¹ ; Carricondo-Antón, J.M. ¹ ; García-Prats, A. ¹ ; Manzano-Juárez, J.², López-Pérez, E. ¹ ; Martínez-Alzamora, F. ¹

¹ Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València, Camino de vera s/n, 46022, Valencia, España. juacaran@upv.es

² Centro Valenciano de Estudios sobre el Riego (CVER), Universitat Politècnica de València, Camino de vera s/n, 46022, Valencia, España.

Resumen:

La evapotranspiración de la vegetación (ET) es un componente clave del balance hidrológico. Se han propuesto varias herramientas y modelos para estimar la evapotranspiración en cultivos frutales. Entre ellos, el enfoque más utilizado es el propuesto por la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO) que tiene en cuenta las variables climáticas incluidas en la evapotranspiración de referencia (ET_o) y el tipo de cultivo y sus características incluidas en un único coeficiente de cultivo (K_c). Sin embargo, existe evidencia de que, en copas altas y discontinuas, como los huertos de cítricos, con un alto grado de acoplamiento con el medio ambiente, K_c puede cambiar dependiendo de las condiciones ambientales locales y la cantidad de vegetación.

Un enfoque aplicado con éxito en la gestión del agua es el uso de modelos que calculan el calor latente como un residuo del balance de energía superficial (SEB).

En este trabajo se ha aplicado un balance de energía para el cálculo de la ET a un distrito de riego. El sitio de estudio está ubicado en la región de Valencia (España; 39°22'43" N, 0°28'20" W) con riego localizado donde la mayoría de los cultivos son cítricos. Se utilizaron imágenes Landsat 8 para el período 2015-2106 para estimar la ET instantánea extrapolando los valores diarios de ET utilizando datos climáticos.

Estos datos climáticos corresponden a las predicciones ofrecidas por el Global Forecast System (GFS). De esta manera se utilizan las predicciones climáticas para realizar la programación frente a la metodología clásica de utilizar los datos del pasado para restituir el agua evapotranspirada.

El objetivo del trabajo es analizar los resultados utilizando un K_c dinámico obtenido a partir del estado real de los cultivos y las predicciones climáticas para cada parcela, frente al uso de un K_c genérico obtenido para unas condiciones estándares y los datos climáticos pasados.

Los resultados ofrecen para las parcelas estudiadas que la relación entre la ET calculada con las predicciones climáticas y SEB frente a la ET real para una semana es de un 9% frente a un 35 % de la metodología FAO y utilizar los datos climáticos de la semana anterior.

Del mismo modo, la metodología permite conocer el grado de estrés de los cultivos y mantenerlo dentro de los límites recomendables.

Palabras clave: Programación del riego, teledetección, predicciones climáticas, evapotranspiración real.

Abstract:

Vegetation evapotranspiration (ET) is a key component of the hydrological balance. Various tools and models have been proposed to estimate evapotranspiration in fruit crops. Among them, the most used approach is the one proposed by the Food and Agriculture Organization (FAO), which takes into account climatic variables included in reference evapotranspiration (ETo) and the crop type and its characteristics included in a single crop coefficient (K_c). However, there is evidence that in tall and sparse canopies, such as citrus orchards, with a high degree of coupling with the environment, K_c can change depending on local environmental conditions and the amount of vegetation.

A successfully applied approach in water management is using models that calculate latent heat as a residual of the surface energy balance (SEB). This study applied an energy balance approach to calculate ET in an irrigation district. The study site is in the Valencia region (Spain; 39°22'43" N, 0°28'20" W) with localized irrigation where most crops are citrus. Landsat 8 images for the period 2015-2016 were used to estimate instantaneous ET by extrapolating daily ET values using climatic data.

These climatic data correspond to predictions the Global Forecast System (GFS) provides. This way, climate predictions are used for scheduling compared to the classical methodology of using past data to estimate evapotranspired water. The objective of the study is to analyze the results using a dynamic K_c obtained from the actual state of crops and climate predictions for each plot, as opposed to using a generic K_c obtained for standard conditions and past climate data.

The results show that for the studied plots, the relationship between ET calculated with climate predictions and SEB versus actual ET for a week is 9% compared to 35% with the FAO methodology and using climate data from the previous week. Similarly, the methodology allows knowing the degree of crop stress and keeping it within recommended limits.

Keywords: Irrigation scheduling, Remote Sensing, Weather forecasts, actual evapotranspiration

1. Introducción

A escala de parcela, la programación del riego es común que se decida semanalmente basándose en las condiciones meteorológicas de la semana pasada. Para ello, se utiliza

La evapotranspiración de referencia (ET_0 , Allen et al. 1998) obtenida de una red agrometeorológica como la ofrecida por el Sistema de Información al Regante (SIAR).

La semana anterior se emplea como referencia para decidir las necesidades de agua de la semana actual. Este método es suficientemente bueno durante periodos con gran estabilidad climática. Sin embargo, durante las temporadas de primavera y otoño, cuando las condiciones atmosféricas pueden cambiar rápidamente, este método de programación semanal es tan incierto y puede producir aleatoriamente tanto sobrieriego como estrés hídrico.

La instalación de sondas de contenido de agua en el suelo permite monitorear el contenido del agua y reproducir el balance suelo-hídrico. No obstante, la información de estas sondas es puntual y no recoge la variabilidad espacial que puede haber en una parcela o distrito de riego

El modelo AQUACROP desarrollado por la FAO permite realizar la simulación del balance hídrico, de manera simplificada para un perfil de suelo. Uno de los parámetros principales de entrada es la cubierta vegetal para a partir de ahí determinar el coeficiente de cultivo dual y calcular la transpiración (K_{cb}), y la evaporación del suelo (K_e).

Otros métodos simplifican el coeficiente de cultivo en uno único coeficiente (K_c) que engloba tanto la evaporación como la transpiración

El K_c y el K_{cb} se calculan experimentalmente y para condiciones estándar de un cultivo donde no hay privación de agua. Los K_c pueden variar si las condiciones no se asemejan a las ensayadas.

A escala de distrito de riego e incluso de parcela, se pueden aplicar dos enfoques generales de teledetección con el objetivo de estimar la ET Gonzalez-Dugo et al (2009).

- i) Estimación de coeficientes de cultivo a partir de índices de vegetación derivados de datos de reflectancia de superficie, y luego usar la ET_0 de una red agrometeorológica para determinar las necesidades de agua
- ii) El segundo enfoque consiste en calcular el calor latente como residuo de la energía superficial (SEB). De esta forma se puede calcular la ET real del cultivo, además de la ET potencial. Para aplicar esta metodología, se requieren sensores con banda térmica.

En este trabajo se evalúa el uso del cálculo de una metodología SEB con la combinación de las predicciones climáticas para la programación de riego y se compara con la tradicional metodología de utilizar los datos climáticos pasados. El modelo SEB utilizado es el Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL) parametrizado para cítricos.

2.2 Cálculo de la Evapotranspiración Real mediante balance de energía

SEBAL calcula ET como el residuo de la ecuación del balance de energía

$$LE = R_n - G - H \quad (1)$$

donde LE es el calor latente de la energía consumida por la evapotranspiración, R_n es la radiación neta, G es el calor sensible transmitido al suelo y H es el calor sensible transmitido por calor al aire, todo en $W m^{-2}$. R_n fue calculado como en Allen et al. (2011). Para el cálculo de G fue adoptado la formula empírica propuesta por Bastiaansen (2000), la cual estima el ratio $G R_n^{-1}$ próximo al medio día como:

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} (0.0038 \cdot \alpha + 0.0074 \cdot \alpha^2) \cdot (1 - 0.98 \cdot NDVI^4) \quad (2)$$

donde T_s es la temperatura de la superficie (K) y α es el albedo superficial

H se calcula a partir de una ecuación aerodinámica

$$H = \frac{(\rho \cdot c_p \cdot dT)}{r_{ah,1,2}} \quad (3)$$

donde ρ es la densidad del aire ($kg m^{-3}$), C_p es el calor específico del aire a presión constante ($1004 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) y $r_{ah,1,2}$ es la resistencia aerodinámica ($s m^{-1}$) entre dos alturas cercanas a la superficie, z_1 y z_2 (generalmente 0.1 y 2 m) sobre la altura del plano de desplazamiento 0 calculada como la función de la resistencia aerodinámica para cada uno de los píxeles de forma individual. dT (K) es la diferencia de temperaturas entre dos alturas z_1 y z_2 (Allen et al. 2011). dT se asume que es lineal y proporcional a T_s como Bastiaansen (1995) empíricamente probó:

$$dT = b + a \cdot T_s \quad (4)$$

Puesto que existen dos variables desconocidas en (3), dt y r_{ah} , se lleva a cabo un proceso de calibración interna. Con este fin se seleccionan dos píxeles extremos que representan una superficie agrícola muy seca y húmeda, respectivamente (Allen et al., 2011).

Como píxel frío se seleccionó un lago cercano, dónde se asumió que dT era 0, suponiendo que la temperatura del aire era igual a T_s y H es 0. El límite superior de la función dT se estima a partir de un píxel caliente donde se asume que el suelo está lo suficientemente seco de forma que $LE=0$.

$$dT_{hot} = \rho_{airhot} \cdot C_p \frac{(R_n - G)}{r_{ahhot}} \quad (5)$$

donde r_{ahhot} es r_{ah} calculada para la rugosidad y condiciones de estabilidad del píxel caliente.

La selección del píxel caliente fue realizada automáticamente entre parcelas identificadas como terreno agrícola y no cultivadas.

La r_{ah} ha sido calculada para las parcelas de cítricos aplicando una relación entre la longitud de la rugosidad para la transferencia del momento (z_{om}) y la altura del cultivo (h) de 0,19 obtenida a partir de datos de Covarianza de Torbellinos (Jiménez-Bello et al. 2015). La altura de los cultivos se ha estimado mediante LIDAR y relacionándola con la cubierta vegetal (GC) obtenida mediante ortofotos correspondientes en el tiempo (Jiménez-Bello et al 2012). Posteriormente se ha remuestreado al tamaño de pixel de Landsat 8 tomando la media más la desviación estándar. Como pixel frío se ha seleccionado un lago próximo. La evapotranspiración instantánea ha sido escalada mediante dos métodos:

- a) El coeficiente de cultivo calculado en el momento de la toma de la imagen (K_{cinst}) se mantiene constante a lo largo del día.

$$K_{c_{inst}} = \frac{ET_{inst}}{ET_{o_{inst}}} \quad (6)$$

- b) La relación entre la evapotranspiración instantánea y la radiación observada (R_s) cuando pasa el satélite, es la misma que la evapotranspiración de cultivo y la radiación observada diaria.

$$ET_{SolRad} = \frac{1}{n} \sum_{d=1}^n \frac{1800 \cdot ET_{inst}(t_d)}{SF_d(t_d)} \quad (7)$$

$$SF_d = \frac{1800 \cdot R_s(t)}{\int_d R_s(t) dt} \quad (8)$$

Tomando como factor de escala (S_{Fd})

Donde 1800 es el número de segundos en 30 minutos

2.3 Cálculo de necesidades de riego mediante método FAO

La metodología adoptada fue la propuesta por Castel (2000) en la que se relaciona k_c con GC tal como se indica en la Tabla 1. El K_c obtenido se asume que es para un cultivo sin restricción de agua.

Tabla 1: Coeficiente de cultivo (K_c) según la cubierta vegetal (GC,%) para cítricos

GC (%)	Relación K_c -GC
$20 > GC$	$K_c = 0.021 + GC * 0.0174$
$20 < GC < 70$	$K_c = 0.274 + GC * 0.005$
$70 < GC$	$K_c = K_{c70}$

A su vez K_c es corregido dependiendo de la época del año como se indica en la Tabla 1

Tabla 2: Factor de corrección mensual del K_c dependiente del mes del año.

kc medio si A>70	f_{mes}											
	Ene	Febr	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
k_{c70}												
0.647	0,97	0,96	0,97	0,91	0,81	0,91	1,00	1,16	1,09	1,24	1,07	0,93

GC fue extraída mediante técnicas de análisis de imágenes como se describe en Jiménez-Bello et al. (2012)

2.4 Imágenes utilizadas

Las imágenes utilizadas han sido las del satélite Landsat 8, las correspondientes a la Colección 2 de Nivel 2 (USGS, 2020) pertenecientes al “Path” 198 y al “Row” 33. Al mismo tiempo se han procesado las del satélite Landsat 7, si bien no se han incluido en este trabajo. Landsat 9 fue lanzado en septiembre del 2021.

Las imágenes libres de nubes para 2015 y 2016 fueron de 12 y 14 respectivamente.

2.5 Datos climáticos

Las predicciones de temperatura, radiación observada, humedad relativa y velocidad del viento para el cálculo de la ET_0 horaria (Allen et al., 2011), se realizaron mediante las previsiones históricas del servicio climático, Global Forecast System (GFS) de la National Centers for Environmental Prediction (NCEP), perteneciente al gobierno de Estados Unidos(<https://www.noaa.gov>).

Los datos climáticos históricos de las predicciones para una semana son realizados cada seis horas. Sin embargo, los datos de las predicciones a tiempo real tienen una frecuencia horaria para las primeras 120 y para las siguientes hasta 3 h.

2.6 Comparación de los resultados

Una vez procesada la imagen mediante la metodología SEBAL y asignado un coeficiente de cultivo dinámico a cada parcela basado en la ET_0 (Kc_{Inst}) y en la Rs (Kc_{Rad}), se extrapolan los resultados utilizando las predicciones del GFS para calcular la ET (ET_{SEBAL_GFS}). Como valor de referencia se utilizan los Kc_{InstL} y Kc_{Rad} de cada parcela extrapolados con la ET_0 y la Rs .

Para evaluar que metodología produce menos error, utilizar las predicciones climáticas semanales (ET_{SEBAL_GFS}), o los datos climáticos de la semana anterior (ET_{SEBAL}), se comparó mediante la media de los valores absolutos de los errores relativos.

Del mismo modo se comparó con la metodología descrita en el Apartado 2.3.

3. Análisis de los resultados

3.1 Evaluación de las predicciones climáticas históricas.

Antes de proceder a aplicar las predicciones climáticas, se compararon las predicciones históricas frente a las acaecidas para la ET_0 y la Rs .

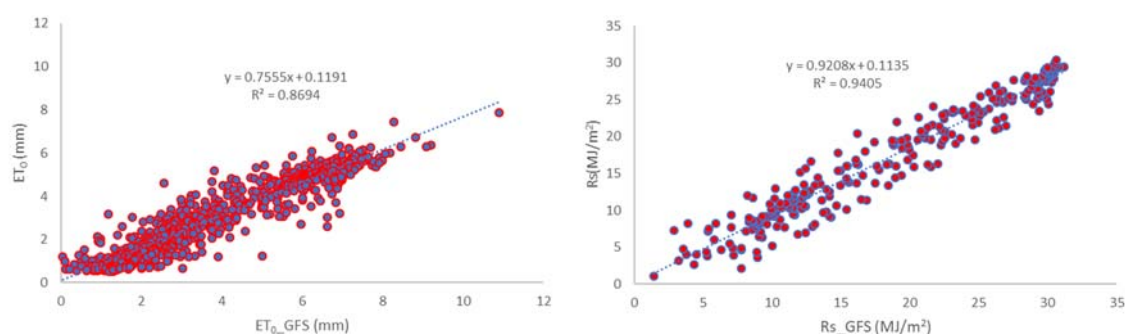


Figura 3 Comparación de la ET_0_GFS y de la Rs_GFS predicha con la ET_0 y la Rs observadas para los años 2015 y 2016

Tanto las predicciones de la ET_0 y la R_s son sobreestimadas por lo que se decidió corregir las predicciones con un simple modelo lineal. El motivo de la sobrestimación de la ET_0 se debe a las predicciones de las temperaturas mínimas. En el caso de la R_s , es la falta de precisión a la hora de predecir la nubosidad. Este patrón se comparó con el resto de los años, repitiéndose siempre con la misma tendencia.

3.2 Evaluación de la estimación de las ET predichas.

En primer lugar se evaluó el error al comparar la ET_0 semanal con la anterior ET_0 , el método comúnmente utilizado para realizar la programación del riego.

La media de los errores relativos absolutos semanales fue de un 20,2 % y de un 20,9 % para la ET_c . En caso de aplicar la metodología FAO descrita en 2.3, este error se produce para todas las parcelas al ser el K_c constante.

No obstante, al comprar la ET_c con la ET_{SEBAL} , asumiendo esta última como valor de referencia, el error cometido fue de un 35,4% y de un 39,3 %.

Comparando la ET_{SEBAL} con la ET_{SEBAL} de la semana anterior, el error cometido medio para todas las parcelas utilizando K_{c_Rad} fue del 26,4 % y del 25,2 para 2015 y 2016. Utilizando K_{c_Inst} , fueron del 27,8 % y del 29,26 %.

Comparando la ET_{SEBAL_GFS} con la ET_{SEBAL} el error cometido medio para todas las parcelas utilizando K_{c_Rad} fue del 8,6 % y del 14,4 para 2015 y 2016. Utilizando K_{c_Inst} , fueron del 21,1 % y del 22,2 %.

El menor error obtenido se debe a que el K_c de los cítricos no se mantiene constante a lo largo del día (Jiménez-Bello et al. 2015).

La Figura 4 muestra para tres parcelas de la zona de estudio la serie de ET_{SEBAL} , ET_{SEBAL_GFS} , ET_{SEBAL_RAD} , $ET_{SEBAL_GFS_RAD}$, ET_{FAO} , todas ellas en mm, la humedad del suelo (%) para los 50 cm, la humedad del suelo (%) para 70 cm tomándola como referencia para el drenaje y el potencial de tallo (bar). Todos estos valores agrupados para frecuencias semanales para los años 2015 y 2016. Asimismo se muestra la evolución de los K_{c_Rad} , los K_{c_Inst} , el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI) utilizando la banda del infrarrojo cercano y el infrarrojo corto.

Durante el año se observa que la ET_{SEBAL} y la ET_{SEBAL_RAD} , se mantienen por debajo de la ET_{FAO} la mayor parte del año para todas las parcelas, excepto las últimas semanas, donde la diferencia es mínima. En los meses estivales los cultivos no sufren estrés al encontrarse por debajo de los límites de 1,3-1,5 MPa de potencial de tallo (Ballester et al. 2011). Incluso se aprecia una subida del contenido de la humedad del suelo en el volumen radicular y de drenaje. De esta manera, se justifica la hipótesis de tomar como referencia la ET_{SEBAL} como referencia, al no existir estrés. Los K_c obtenidos en Castel (2000) no se adaptaron tan bien como los obtenidos por un SEB.

Sin embargo, para el año 2016 durante las semanas invernales y al comienzo de la primavera, ET_{SEBAL} era mayor que ET_{FAO} . Observando los índices NDVI y NDWI para estas fechas, eran anormalmente bajos. Procediendo a una observación manual del proceso, la zona de estudio estaba cubierta por nubes de baja intensidad que desvirtuaban los resultados.

Para evitar estas situaciones, el uso combinado de las imágenes de LANDSAT 8, junto con las imágenes de LANDSAT 7 y 9 permite mejorar la resolución temporal, evitando periodos largos sin actualización del estado de los cultivos.

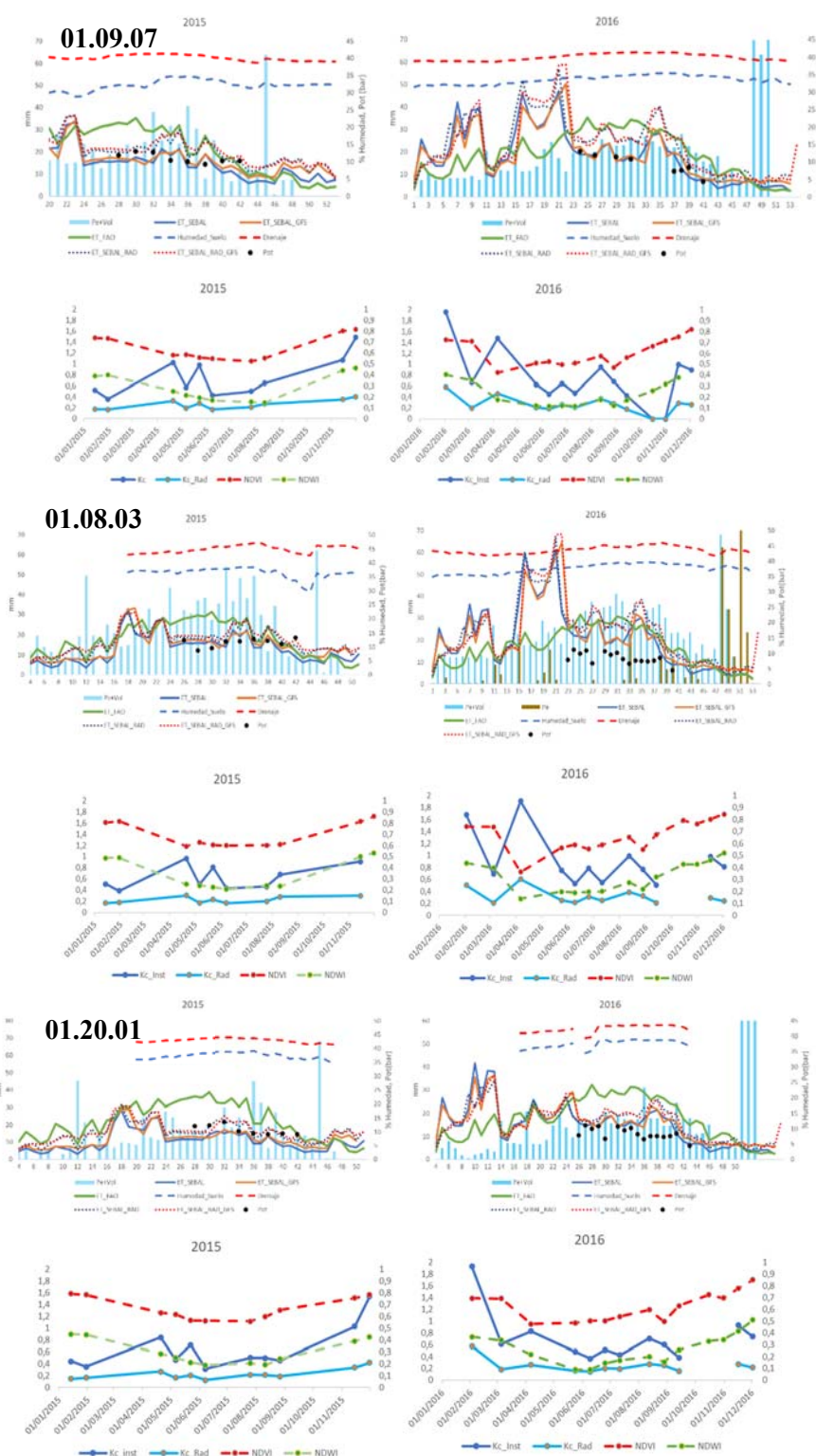


Figura 4 Series de Evapotranspiración de Referencia ET_0 y de precipitación (mm) de los años 2015 y 2016 para la zona de estudio

4. Conclusiones

El uso de las predicciones climáticas para calcular la demanda real de los cultivos, en este caso cítricos, permite reducir el error hasta en un 8,6 % en la programación del riego semanal para el mejor de los casos utilizando los coeficientes de cultivo dinámicos obtenidos mediante balance de energía y el uso de las predicciones históricas del GFS. Este error se obtiene utilizando el método de escalado utilizando R_s .

Procediendo de la manera habitual, con K_c obtenidos en ensayos experimentales y con la ET_0 de la semana anterior, el error es de un 20 %, si bien se asume que la ET_c es la real. No obstante, está demostrado que extrapolar este valor a distintas condiciones y distintas parcelas conlleva un error en la determinación de la ET, por lo que tomando como referencia la ET calculada con un método SEB el error aumenta hasta un 35,4 % - 39,4%.

El uso de otras misiones conjuntas de Landsat donde las imágenes se corrigen y procesan al poco tiempo de su paso junto con el uso de predicciones en tiempo real donde las frecuencias de datos son mejores que las históricas permitiría ajustar más las necesidades.

El uso de estos datos debe combinarse con modelos agrodhidrológicos para conocer el agua disponible en cada momento.

5. Referencias

Allen R G, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Rome, Italy.

Ballester, C., Castel, J., Intrigliolo, D., Castel, J., (2011). Response of Clementina de Nules citrus trees to regulated deficit irrigation. Yield components and fruit composition. Agric. Water Manag. 98, 1027–1032.

Bastiaanssen W G M (1995) Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: a remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates. PhD Diss., CIP Data Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, the Netherlands; 273.

Castel, J.R., 2000. Water use of developing citrus canopies in Valencia, Spain. Proceeding International Society Citriculture, IX Congress:223-226.

M. P. Gonzalez-Dugo et al., "A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration," Agric. For. Meteorol., vol. 149, pp. 1843–1853, 2009.

Jiménez-Bello M.Á, Ruiz L.Á, Hermosilla T, Recio J, Intrigliolo D.S (2012). Use of remote sensing and geographic information tools for irrigation management of citrus trees. chapter Use of remote sensing and geographic information tools for irrigation management of citrus trees:147-160; CIHEAM., ISBN: 2-85352-482-5.

Jiménez-Bello M.A., Castel J.R.; Luca T., Intrigliolo D.S. (2015). Assessment of a remote sensing energy balance methodology (SEBAL) using different interpolation methods to determine evapotranspiration

USGS (2020) USGS EROS Archive - Landsat Archives - Landsat 8-9 OLI/TIRS Collection 2 Level-2 Science Products. URL://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-8-9-olitis-collection-2-level-2