

<https://doi.org/10.23854/07199562.202258esp.Quezada99>

ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO A PARTIR DE VUELOS DE DRON.

ESTIMATION OF CROP EVAPOTRANSPIRATION FROM DRONE FLIGHTS.

Sr. Vicente Quezada Arancibia¹

RESUMEN

En este trabajo se aplica un modelo desacoplado de dos fuentes llamado "STSEB" (Simplified Two-Source Energy Balance) que tiene como propósito mediante información local sobre la temperatura del aire, meteorología, topografía, así como datos adicionales *in situ*, calcular la evapotranspiración de cultivo a través de imágenes multiespectrales y térmicas obtenidas desde un dron. Lo anterior, con la finalidad de clasificar las zonas prioritarias de riego de una parcela de almendros y poder comparar los resultados con la actual planificación de tratamientos de agua obtenida mediante instrumentos de agricultura de precisión. Al finalizar el trabajo, se pudo determinar que existe una precisión de un 75% entre el plan de tratamiento de riegos de los administradores de la parcela y el obtenido mediante la aplicación de técnicas de teledetección.

Palabras clave: STSEB, evapotranspiración, planificación de riego, cultivo.

ABSTRACT

In this work, a two-source decoupling model called "STSEB" (Simplified Two-Source Energy Balance) is applied, whose purpose, through local information on air temperature, meteorology, topography, as well as additional data *in situ*, is to calculate the crop evapotranspiration through multispectral and thermal images obtained from a drone. The foregoing, with the purpose of classifying the priority irrigation areas of a plot of almond trees and being able to compare the results with the current planning of water treatments obtained by means of precision agriculture instruments. At the end of the work, it was possible to determine that there is an accuracy of 75% between the irrigation treatment plan of the administrators of the plot and the one obtained through the application of remote sensing techniques.

Keywords: STSEB, evapotranspiration, irrigation planning, cultivation.

¹ Oficial de Ejército, Ingeniero Politécnico Militar mención Geografía, Magister en Teledetección.

Fecha de recepción: 27 de Julio de 2022.

Fecha de aprobación: 13 de Septiembre de 2022.

INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento vital para supervivencia de los seres vivos y en especial para el cultivo, para que pueda realizar sus procesos vitales y se desarrolle adecuadamente. En este contexto y considerando el agua como un bien escaso en muchas zonas de España, es necesario realizar una correcta distribución de este recurso, para lo cual existen métodos de teledetección que permiten evaluar el estado hídrico del cultivo, con el propósito de determinar las zonas prioritarias de riego, para mantener un control y un monitoreo de la distribución del agua, según la necesidad hídrica de las zonas vegetadas.

El cultivo en ciertas épocas del año, debido a las temperaturas que alcanza la superficie del suelo y otros factores climatológicos, se ve afectado por procesos físicos donde el agua contenida sufre cambios de estado, estos procesos se conocen como la evaporización y transpiración, o juntando los dos conceptos como evapotranspiración, produciendo la pérdida de contenido de agua del suelo y del cultivo. Dicha pérdida se debe recuperar para que no se produzca un estrés hídrico y el cultivo se desarrolle de la forma más adecuada.

La evapotranspiración no es simple de medir. Para determinarla experimentalmente se requiere de instrumental específico y mediciones precisas de varios parámetros físicos o el balance del agua del suelo en lisímetros. Los métodos experimentales de campo son en general de altos costos, exigiendo precisión en las mediciones, y pueden ser completamente realizados y analizados

apropiadamente solo por personal de investigación suficientemente preparado y capacitado (Allen et al, 2006).

Una solución de bajos costos ha sido la utilización de imágenes satelitales del programa "LANDSAT" o "COPERNICUS", que permiten estimar la evapotranspiración de cultivo, sin embargo, tienen la desventaja de tener una baja resolución espacial y temporal, considerando el trabajo de precisión que se necesita y la dependencia limitante al paso del satélite por la zona de estudio.

El avance de la tecnología y la aparición de drones multispectrales solucionan este problema, ya que tienen una alta resolución espacial y completa autonomía para ser utilizados oportunamente. De esta forma, el presente trabajo tiene como propósito la aplicación del modelo STSEB, para calcular la evapotranspiración de cultivo, a través de imágenes obtenidas por un dron y la elaboración de una planificación de riego.

A modo de ejemplo, la investigación se centra en una parcela de almendros con la finalidad de comparar el producto obtenido mediante la aplicación del modelo y la planificación de los administradores de dicha parcela.

ZONA DE ESTUDIO Y MEDIDAS

La zona de estudio está ubicada en España en una zona agrícola cercana al municipio de Barrax, perteneciente a la provincia de Albacete, con ubicación geográfica como se muestra en la Figura 1.

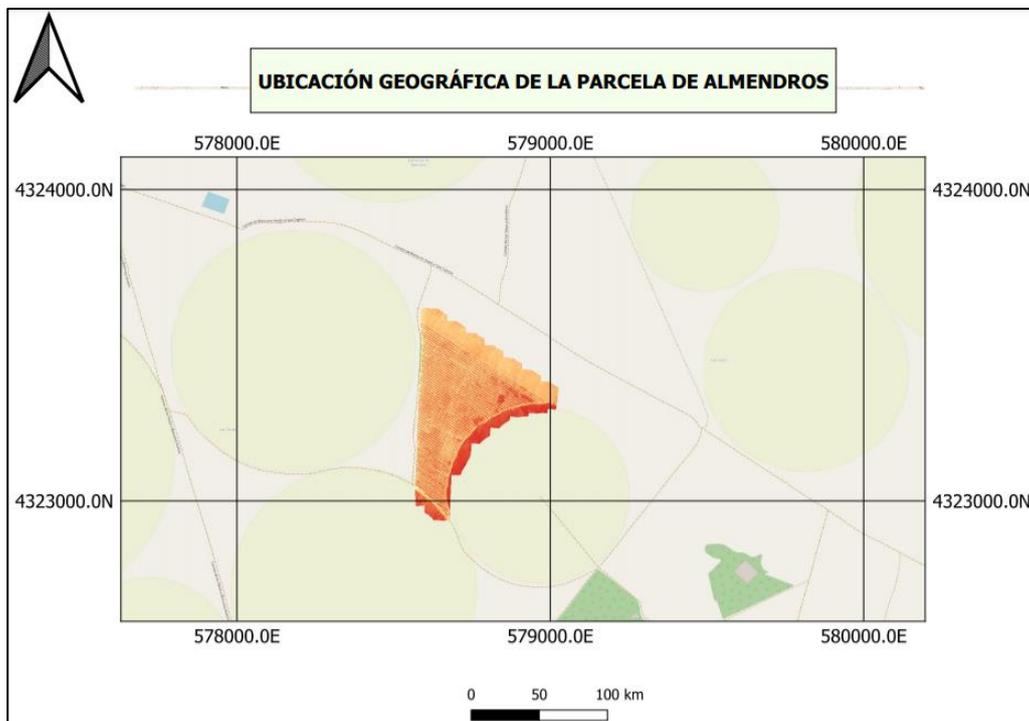


Figura 1- Ubicación geográfica de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

MEDIDAS DE CAMPO

Los datos que se muestran a continuación en la Tabla 1, fueron obtenidos el 23 de julio del 2020 a las 10:30 UTC, mediante la medición en terreno y por información proporcionada por una estación meteorológica, ubicada cerca de la propia parcela de almendros.

| DESCRIPCIÓN | PARAMÉTRICO | VALOR 10:30 UTC APROX |
|--|---|-----------------------------|
| Radiación solar incidente | S (w m^{-2}) | 896 |
| Radiación solar de onda larga incidente | L_{SKY} (w m^{-2}) | 392 |
| Temperatura del aire | T_a (K) | 300,95 |
| Velocidad del viento | U (m/s) | 1,15 |
| Densidad del aire*calor específico del aire a presión constante. | ρC_p ($\text{J K}^{-1}\text{m}^{-3}$) | 1096,8 |
| Coefficiente radiación neta diaria frente a instantánea | R_{nd}/R_{ni} | 0,303 |
| Densidad del agua*calor latente de vaporización del agua | ρ^*L_v | 2434970 |
| Resistencia aerodinámica del aire | r_a^a (s/m) | 31,3 |
| Resistencia aerodinámica del aire | r_a^h (s/m) | 59,3 |
| Resistencia aerodinámica del suelo | r_a^s (s/m) | 101,3 |
| Altura del cultivo | h (m) | 3,71 |
| Emisividad del suelo | ϵ_s | 0,957 |
| Emisividad de la vegetación | ϵ_c | 0,985 |

Tabla 1 – Datos biofísicos obtenidos por la estación meteorológica. Fuente: Elaboración propia.

MEDIOS DE TELEDETECCIÓN

La plataforma de vuelo empleada para obtener las imágenes de la parcela de almendros fue un dron DJI M-600, que portaba un sensor “RedEdge-MX”, instrumento multispectral profesional con capacidad de captura de cinco bandas espectrales, como se ilustra en la Tabla 2.

| NOMBRE DE LA BANDA | CENTRO DE BANDA | ANCHO DE BANDA |
|--------------------|-----------------|----------------|
| Azul | 475 nm | 32 nm |
| Verde | 560 nm | 27 nm |
| Rojo | 668 nm | 14 nm |
| Borde rojo | 717 nm | 12 nm |
| Infrarrojo cercano | 842 nm | 57 nm |

Tabla 2 – Bandas espectrales del sensor. Fuente: Elaboración propia.

El sensor RedEdge-MX que se muestra en la Figura 2, según la información proporcionada por el fabricante, tiene una resolución espacial o tamaño de píxel (GSD) optimizado de 8 cm a 120 m de altura, también incluye un obturador global para obtener capturas sin distorsión. Además, tiene un sensor de luz adicional (DLS 2) para una calibración radiométrica de alta precisión.



Figura 2 - Sensor RedEdge-MX. Fuente: imagen obtenida desde la página web del fabricante.

Como se puede apreciar en la Figura 3, otro sensor que tiene acoplado el dron para obtener las imágenes es una cámara térmica modelo: Tau™ 2 Mod 336, 100 mm f/1.6, la que fue utilizada para obtener la temperatura de la superficie de la zona de estudio, esta opera en el rango de los 7,5 a 13,5 μm de longitud de onda. Este sensor tiene interoperatividad técnica con el sensor multispectral, ya que tienen una similar resolución espacial, permitiendo obtener imágenes comparables cuantitativamente.



Figura 3 - Tau™ 2 Mod 336, 100 mm f/1.6. Fuente: imagen obtenida desde la página web del fabricante.

METODOLOGÍA

A continuación, en la Figura 4 se describe la metodología que se empleó para la materialización de este trabajo, obteniendo como productos finales, la evapotranspiración de cultivo de almendros y la elaboración de un mapa de prioridades de riego.

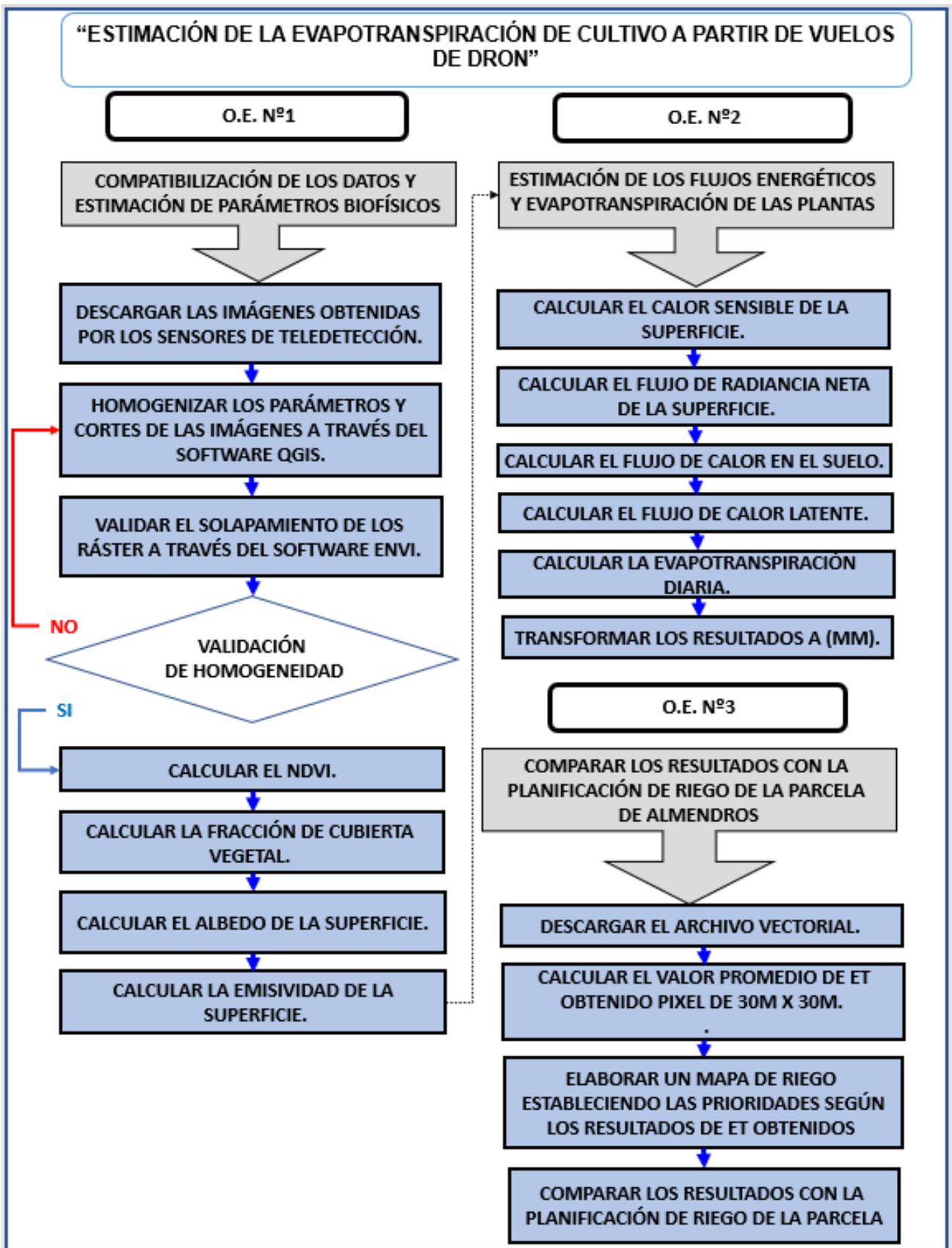


Figura 4 – Secuencia metodológica. Fuente: Elaboración propia.

CORRECCIÓN DE LAS IMÁGENES

Al descargar las imágenes como se aprecia en la Figura 5, existen problemas en la homogeneidad de los datos, esto debido a que los sensores son diferentes y no están integrados, presentándose diferencias en los cortes, tamaño del píxel y dimensiones de los ráster.

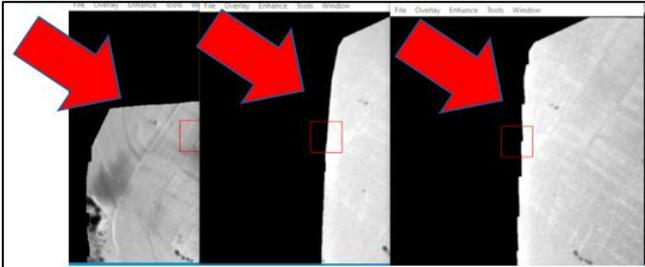


Figura 5 - Problemas de homogeneidad de las imágenes
Fuente: Elaboración propia.

Para solucionar esta problemática, se re proyectaron todas las imágenes a 10 cm de resolución espacial y posteriormente se creó una máscara espacial para

cortar todas las imágenes de manera uniforme. Una vez realizado lo anterior, se validaron los resultados en el software ENVI, verificando la homogeneidad de los datos y comprobando la corrección geométrica de todas las imágenes. La metodología utilizada consistió en determinar puntos de control resaltantes identificados en la parcela, donde se controló la coincidencia y el solape de las diferentes imágenes en dichos puntos. Esto permitió operar con las imágenes y obtener los resultados que se presentan a continuación.

RESULTADOS

PARÁMETROS BIOFÍSICOS

El objetivo de esta primera parte fue la estimación de algunos parámetros fundamentales para la correcta ejecución del modelo de balance de energía de dos fuentes STSEB.

a. CÁLCULO DE NDVI

Para realizar este cálculo se utilizó la expresión que se ilustra en la Ecuación 1, donde NIR corresponde a la imagen obtenida en la banda del infrarrojo cercano y RED a la obtenida en el rojo.

$$\text{Ecuación 1: } NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}$$

Los resultados se pueden apreciar en la Figura 6, donde el suelo desnudo toma valores bajos de NDVI, en contraste con los valores altos correspondientes a zonas con vegetación.

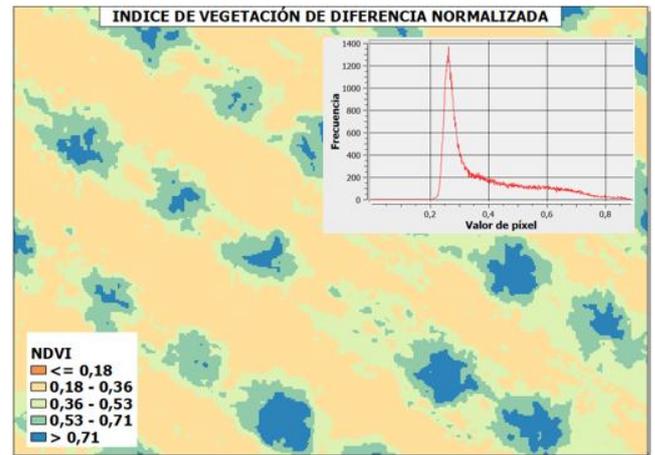


Figura 6 - índice de vegetación de diferencia normalizada.
Fuente: Elaboración propia.

b. FRACCIÓN DE CUBIERTA VEGETAL

Para calcular la porción de vegetación se utilizó la expresión propuesta por Chávez (1998), que se puede apreciar en la Ecuación 2, estimando un píxel característico de NDVI de la vegetación (0,887) y uno de suelo desnudo (0,2).

$$\text{Ecuación 2: } FCV = \frac{(NDVI - NDVI_s)^2}{(NDVI_v + NDVI_s)^2}$$

En la Figura 7 se ilustra el resultado obtenido, donde se puede observar una distribución de valores entre 0 y 1, siendo los valores más bajos correspondientes a zonas de suelo desnudo y aquellos más altos a sectores con abundante vegetación.

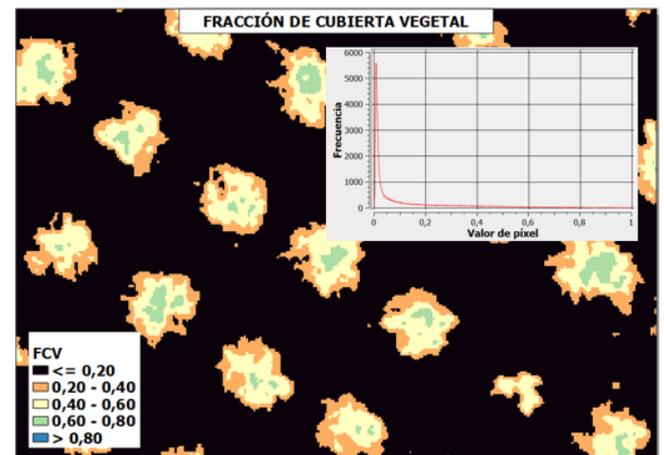


Figura 7 – Fracción de cubierta vegetal. Fuente: Elaboración propia.

c. ALBEDO DE LA SUPERFICIE

Para calcular el albedo de la superficie se tiene una expresión propuesta por Wang et al (2000) para Landsat 5 TM, la cual se muestra en la Ecuación 3.

$$\text{Ecuación 3: } \alpha = 0,221\rho_1 + 0,162\rho_2 + 0,102\rho_3 + 0,354\rho_4 + 0,059\rho_5 + 0,0195\rho_7$$

Los coeficientes están determinados para cada banda, sin considerar la banda número seis correspondiente al espectro térmico. Para utilizar esta expresión con las imágenes obtenidas desde el dron, se presenta la dificultad que el sensor multiespectral tiene solamente cuatro bandas, por lo tanto, se debe ajustar estos coeficientes. En este contexto, se realizó una nueva ponderación de los cuatro primeros pesos de la Ecuación 3. Lo anterior, con el propósito de adecuar esta expresión de seis coeficientes y transformarla a una de cuatro coeficientes.

Este cálculo se puede realizar, debido a que las cuatro primeras bandas de Landsat TM coinciden en el rango espectral con las obtenidas con el sensor RedEdge-MX.

La metodología utilizada fue la validación cruzada, donde se asignaron diferentes ponderaciones a los cuatro primeros coeficientes, seleccionando aquellas que cuantitativamente dieron mejores resultados, correspondiendo a una penalización aproximadamente de un 10% para los primeros cuatro coeficientes. Siendo la expresión resultante la que se muestra en la Ecuación 4.

$$\text{Ecuación 4: } \alpha = 0.245\rho_1 + 0.181\rho_2 + 0.114\rho_3 + 0.360\rho_4$$

Una vez comprobado y validado el método, se aplicó la Ecuación 4 a las imágenes obtenidas por el dron, obteniendo como resultado el albedo de la superficie de estudio, como se muestra en la Figura 8.

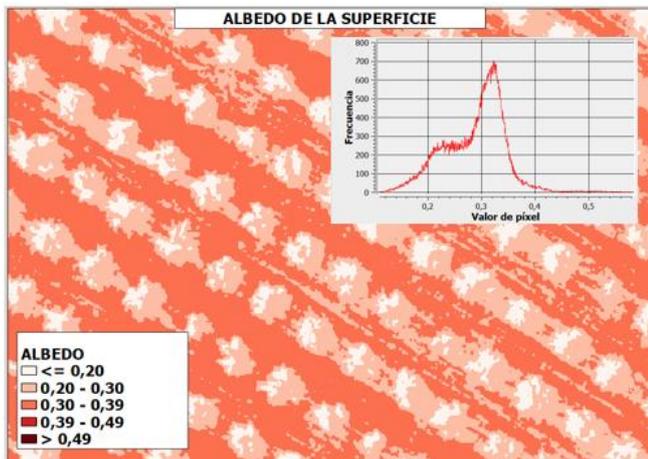


Figura 8 – Albedo de la superficie. Fuente: Elaboración propia.

d. EMISIVIDAD DE LA SUPERFICIE

Para el cálculo de emisividad se utilizó la Ecuación 5 propuesta por Valor y Caselles (1996), donde P_v es la fracción de cubierta vegetal. Se asumió unos valores de emisividad para el suelo, ϵ_s , y para la vegetación, ϵ_c , de 0,957 y 0,985, dichos valores fueron obtenidos mediante la aplicación en terreno del modelo TES (Temperature and Emisivity Separation).

$$\text{Ecuación 5: } \epsilon = \epsilon_c P + \epsilon_s (1 - P_v) (1 - 1.74 P_v) + 1.7372 P_v (1 - P_v)_v$$

El resultado obtenido de emisividad se muestra en la Figura 9, donde se puede apreciar que la vegetación tiene una mayor emisividad que el suelo desnudo, esto se debe principalmente al contenido de agua de las plantas, debido a que este elemento vital es un buen absorbente y cumple con la ley de Kirchhoff que dice que “los buenos absorbentes son buenos emisores”.

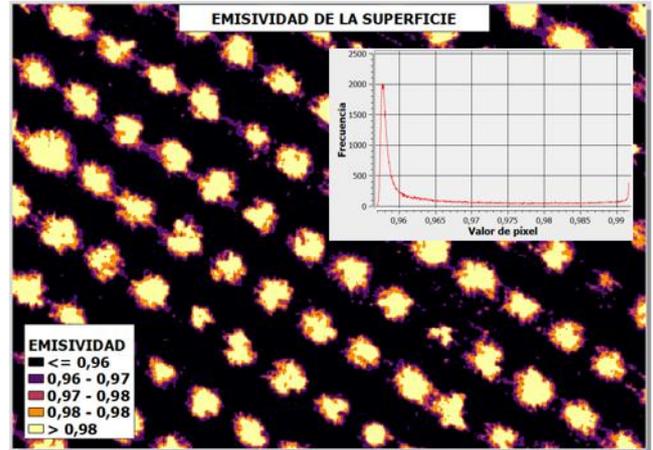


Figura 9 – Emisividad de la superficie. Fuente: Elaboración propia.

FLUJOS ENERGÉTICOS

Este trabajo se desarrolla bajo el modelo simplificado de balance de energía de dos fuentes, llamado STSEB (Simplified Two-Source Energy Balance), propuesto por Sánchez et al (2007), basado en la representación desacoplada del intercambio de energía del suelo y la vegetación. El balance de energía entre el sistema suelo-vegetación-atmósfera viene dado por la Ecuación 6.

$$\text{Ecuación 6: } R_n = H + LE + G + F$$

Donde R_n es el flujo de radiación neta ($W \cdot m^{-2}$), H es el flujo de calor sensible ($W \cdot m^{-2}$), G es el flujo de calor en el suelo ($W \cdot m^{-2}$), y F es el término de almacenamiento de calor en las plantas ($W \cdot m^{-2}$). Para estructuras de vegetación no muy altas, se puede despreciar el término F , debido a que su contribución al balance de energía global es muy pequeña y difícil de estimar (Sánchez et al, 2007).

a. CÁLCULO DE CALOR SENSIBLE (H)

Para el cálculo de H se emplea el modelo desacoplado de dos fuentes propuesto por Sánchez et al, (2008). Este modelo tiene en cuenta las contribuciones al flujo total procedentes del suelo, H_s , y de la vegetación, H_c , para este cálculo se utilizó las Ecuaciones 7 y 8. Tomando como temperatura característica de la vegetación y del suelo los siguientes valores representativos de la zona de estudio $T_c=299,15 \text{ K}$, $T_s=324 \text{ K}$.

Ecuación 7: $H_c = \rho C_p * \frac{T_c - T_a}{r_a^h} = -33,292$

Ecuación 8 : $H_s = \rho C_p * \frac{T_s - T_a}{r_a^a - r_a^s} = 190,658$

Con los valores obtenidos, se procede a calcular el flujo de calor sensible “H” aplicando la Ecuación 9, obteniendo los resultados que se muestran en Figura 10.

Ecuación 9: $H = P_v H_c + (1 - P_v) H_s$

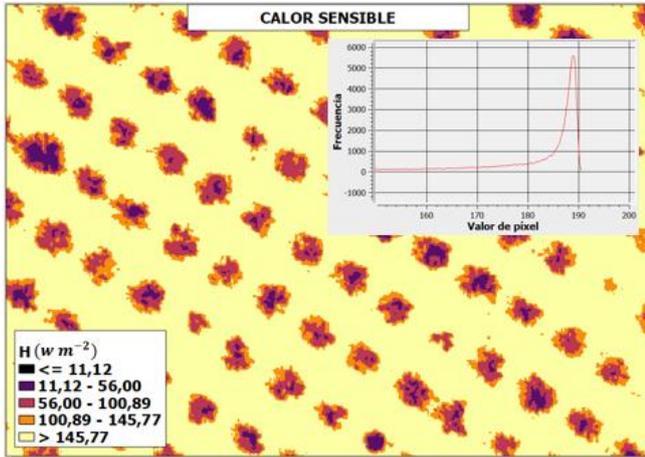


Figura 10 – Flujo de calor sensible (H). Fuente: Elaboración propia.

b. FLUJO DE RADIACIÓN NETA

Se cálculo R_n estableciendo el balance entre la radiación de onda corta y onda larga a través de la Ecuación 10.

Ecuación 10: $R_n = (1 - \alpha)S + \epsilon L_{SKY} - \epsilon \sigma T_R^4$

Donde S es la radiación incidente de la onda corta ($W m^{-2}$); L_{SKY} es la radiación hemisférica incidente de onda larga; α es el albedo; $\sigma=5,67 \cdot 10^{-8}$ ($W m^{-2} K^{-4}$) es la constante de Stefan-Boltzmann.

Se programa lo anterior en el software QGIS, considerando los productos que fueron obtenidos precedentemente (albedo, emisividad, temperatura (K)), obteniendo el producto que se presenta en la Figura 11.

c. FLUJO DE CALOR EN EL SUELO

Existen diversos métodos para obtener el flujo de calor en el suelo, tomando como base el propio flujo de radiación neta. En este trabajo se recurrió a un modelo sencillo, de acuerdo con el cual el flujo de calor en el suelo se obtiene como una fracción (CG) de la radiación neta (Choudhury et al, 1987) como se muestra en la Ecuación 11, siendo el resultado obtenido el de la Figura 12.

Ecuación 11: $G = C_G(1 - P_v)R_n$

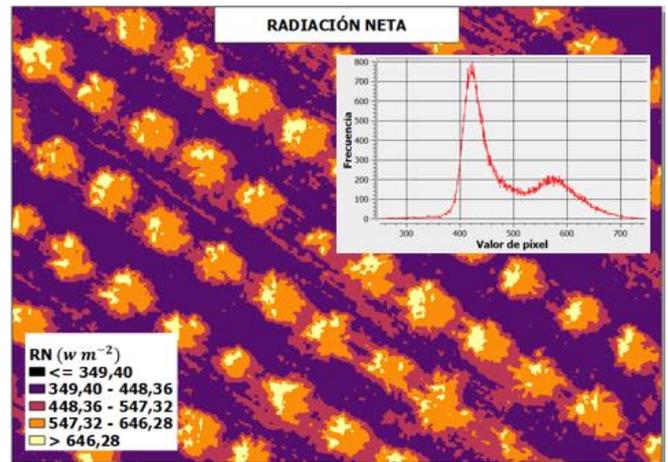


Figura 11 – Flujo de radiación neta (RN). Fuente: Elaboración propia.

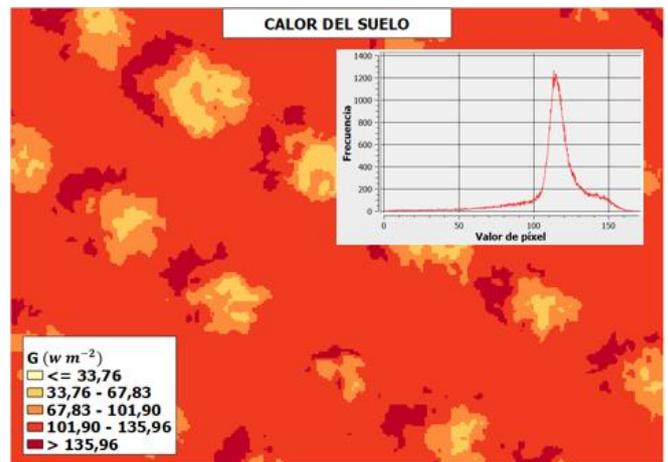


Figura 12 – Flujo de calor del suelo (G). Fuente: Elaboración propia.

d. FLUJO DE CALOR LATENTE

A continuación, en la Figura 13 se obtiene el flujo de calor latente como un término residual a partir de la Ecuación 12, sin embargo, hay que tener en cuenta que todos estos flujos son valores instantáneos, es decir, calculados a la hora del trabajo de campo 10:30 UTC. Para llevarlos a valores diarios es necesario aplicar las técnicas de extrapolación de unidades.

Ecuación 12: $LE = R_n - G - H$

EVAPOTRANSPIRACIÓN DIARIA

A escala diaria (“d”), se puede despreciar el término G, y la evapotranspiración diaria se puede obtener a partir de los valores instantáneos (“i”) conforme a la

Ecuación 13, que considera los flujos energéticos calculados a las 10:30 UTC.

Donde el cociente R_{nd}/R_{ni} varía con la hora, el día del año y la latitud, pero no con el tipo de vegetación.

$$\text{Ecuación 13: } LE_d = R_{nd} - H_d = \frac{R_{nd}}{R_{ni}} (R_{ni} - H_i)$$

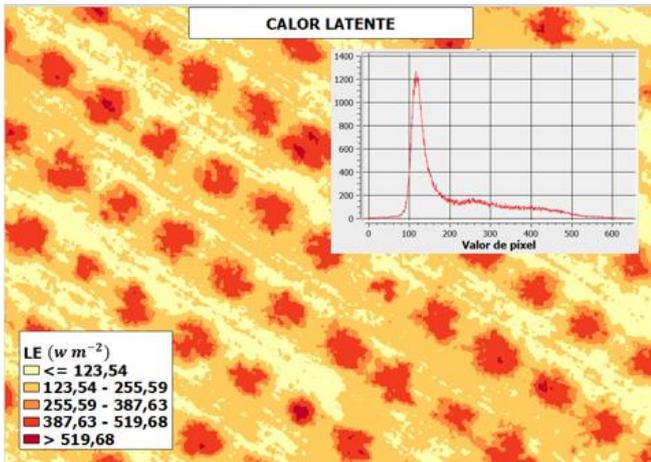


Figura 13 – Flujo de calor latente (LE). Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de flujos energéticos están en unidades de energía ($W m^{-2}$), para transformar LE a valores de ET (mm) se realizó la conversión propuesta en la Ecuación 14. Los resultados obtenidos se pueden apreciar en la Figura 14, donde la gráfica indica que hay zonas vegetadas que alcanzan un máximo de evapotranspiración de hasta 7 mm.

$$\text{Ecuación 14: } ET (mm) = TIEMPO(s) \frac{LE}{\rho \gamma v}$$

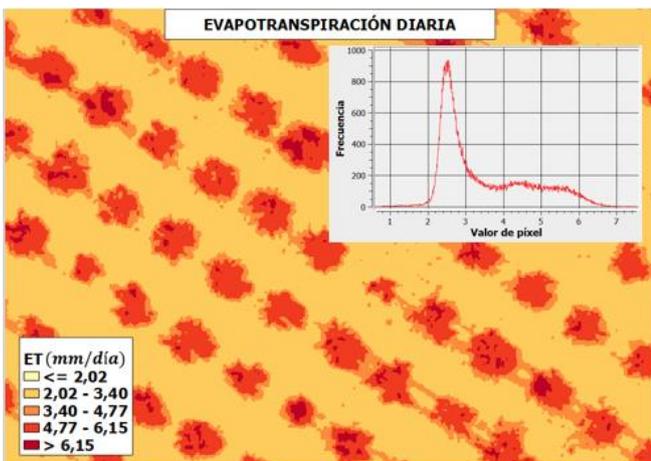


Figura 14 – Evapotranspiración diaria (ET). Fuente: Elaboración propia.

ZONA DE RIEGO

Esta etapa es fundamental para poder hacer una eficiente distribución del agua y ejecutar una correcta

racionalización del recurso, en este sentido en un principio la planificación de tratamiento de riego fue levantada por la administración de la parcela de almendros, en conformidad a la Figura 15, la cual fue elaborada mediante estudios de campo y trabajo en el software QGIS. Además, consideraron un archivo vectorial con el tamaño de píxel de una imagen obtenida del sensor TM de Landsat 8, con una resolución espacial del píxel de 30x30 m, esto con el propósito de aplicar el modelo STSEB a imágenes obtenidas desde el satélite y también por imágenes derivadas por dron, siempre que cubran ese tamaño de píxel, para de esta forma poder comparar los distintos métodos para determinar las zonas prioritarias de regadío.

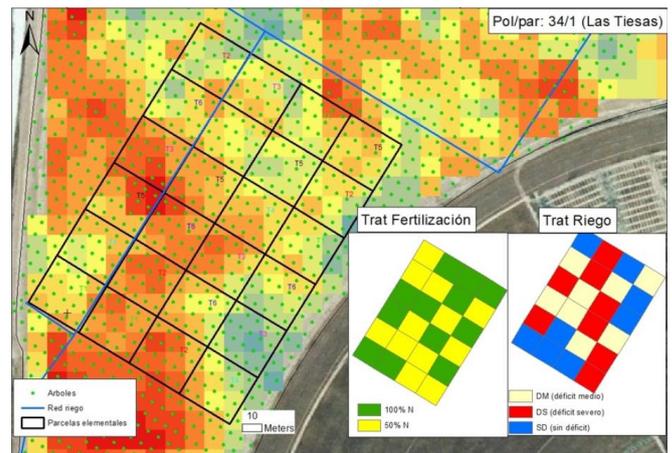


Figura 15 - Plan de regadío de la administración de la parcela. Fuente: imagen proporcionada por el administrador de la parcela, 2020.

Para obtener el plan de regadío resultante de la aplicación del modelo a las imágenes obtenidas con el dron, se utilizó los valores obtenidos de evapotranspiración diaria y se cargaron en el software QGIS, con la finalidad de obtener el promedio de ET de cada uno de los cuadrantes y de esta forma poder determinar una planificación de tratamiento de riego, como se presenta en la Figura 16.

De los resultados obtenidos se puede determinar que existe coincidencia en un 75% con el plan de regadío de la administración de la parcela.

En la Tabla 3 se muestra el porcentaje de coincidencia en cada una de las clasificaciones, existiendo un mayor porcentaje de equivalencia en las zonas sin déficit (SD), que son los cuadrantes representados con color azul, las otras dos clasificaciones déficit severo (DS) y déficit medio (DM) obtienen un menor porcentaje de coincidencia.

CONCLUSIONES

La homogeneidad de los datos es trascendental para poder obtener resultados válidos, debido a que, en caso contrario, no existiría solapamiento entre las

imágenes, lo que llevaría a obtener resultados erróneos.

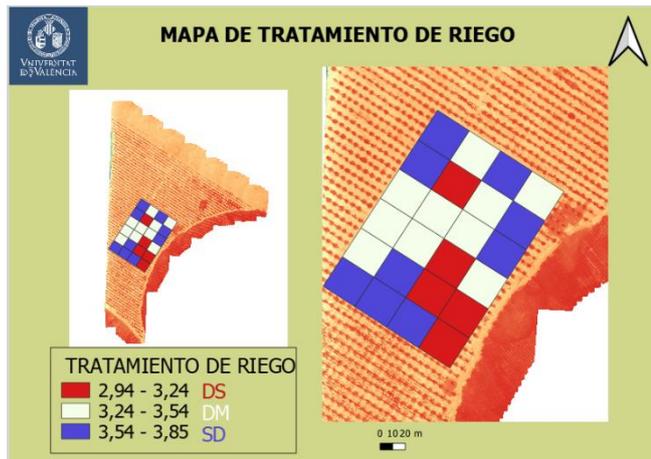


Figura 16 – Clasificación de prioridades de riego. Fuente: Elaboración propia.

| Clasificación | Coincidencia | No Coincidencia | % Coincidencia |
|-----------------------|---------------------|---------------------|----------------|
| SD (Azul) | 8 cuadrantes | 0 cuadrante | 100% |
| DS (Rojo) | 4 cuadrantes | 4 cuadrantes | 50% |
| DM (Blanco) | 6 cuadrantes | 2 cuadrantes | 75% |
| Total de coincidencia | | | 75% |

Tabla 3 – Comparación de planificaciones de regadío. Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo de los parámetros biofísicos es necesario contar con sensores multiespectrales y con un sensor térmico que sean compatibles (interoperatividad técnica), considerando que la aplicación del modelo es un trabajo de precisión, que requiere como datos de entrada las medidas de temperatura del suelo y de la vegetación.

El método validación cruzada tuvo buenos resultados, al extrapolar los coeficientes estimados para el sensor Thematic Mapper de Landsat a coeficientes modificados para el cálculo de albedo de las imágenes obtenidas con el dron, lo cual queda de manifiesto al observar la elevada correlación existente entre las imágenes de albedo, calculada con cuatro y seis coeficientes.

El agua es un bien escaso y como se puede apreciar en los resultados, la evapotranspiración puede llegar hasta 7 mm de pérdida de agua en zonas abundantes de vegetación. Considerando que la zona es de aproximadamente 15 ha, es fundamental contar con un eficiente plan de regadío, en este contexto, se pudo determinar que la actual planificación de la administración de la parcela coincide en un 75% con el plan de regadío que se propone conforme a los resultados de la aplicación del modelo STSEB. Por ello, se comprueba la eficiencia del modelo de teledetección y se estima que es un proceso que

permite apoyar la planificación de regadío y monitorear el estado hídrico del cultivo.

Finalmente, cabe señalar que el modelo empleado a modo de ejemplo en una parcela de almendros se puede aplicar a cualquier tipo de cultivo independiente de sus características, siendo esto relevante especialmente en las zonas de España, donde existe escasez de agua, ya que una eficiente distribución de este recurso es fundamental para el buen desarrollo del cultivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, Richard, PEREIRA, Luis, DIRK, Raes, SMITH, Martin J. Y PRUITT, W. Evapotranspiración del cultivo. Estudio FAO riego y drenaje, (56): 10, 2006.

CHÁVEZ, Pat. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. Remote Sensing of Environment, 24, 459–479, abril 1988.

CHOUDHURY, B. J., IDSO, S. B., REGINATO, R. J. Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an infrared-temperature based energy balance equation. Agricultural and Forest Meteorology, 39, 283-297, abril 1987.

Rededge-mx-multispectral-kit-micasense. ENTERPRISE DEALER CHILE. Disponible en: < <https://heliboss.cl/camaras/779-rededge-mx-multispectral-kit-micasense.html>>. Fecha de consulta 04 de septiembre de 2022.

SÁNCHEZ, J. M., CASELLES, V. VALOR, E., COLL, CET.AL. Estimación de flujos de energía en superficie en un cultivo de maíz a partir de medidas de temperatura radiométrica del suelo y de la vegetación. Revista de Teledetección, 28, 77-86, diciembre de 2007.

SÁNCHEZ, J. M., KUSTAS, W. P., CASELLES, V., ANDERSON, M. C., “Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations”. Remote Sensing of Environment, 112, (3): 1130- 1143, 2008.

Tau™ 2 Mod 336, 100 mm f/1.6. TELEDYNE FLIR. Disponible en: < <https://www.flir.com/products/tau-2/>>. Fecha de consulta 04 de septiembre de 2022.

VALOR, E., CASELLES, V. “Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African and South American areas”. Remote Sensing of Environment, 57, 167-184, septiembre de 1996.

WANG, J., WHITE, K., ROBINSON, G. J. Estimating surface net solar radiation by use of Landsat-5 TM and

digital elevation models. Int.J. of remote sensing, 21,
(1): 31-43, 2000.