

Estimación de la evapotranspiración con fines de riego en tiempo real de un olivar a partir de imágenes de un drone en zonas áridas, caso La Yarada, Tacna, Perú

Estimation of evapotranspiration for irrigation purposes in real time of an olive grove from drone images in arid areas, case of La Yarada, Tacna, Peru

Rrody Machaca-Pillaca¹, Edwin Pino-Vargas², Lía Ramos-Fernández^{1*},
Javier Quille-Mamani², Alfonso Torres-Rua³

RESUMEN

En el presente estudio, se usa técnicas de teledetección mediante un Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) para la estimación de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) en el olivo (*Olea europaea* L.) en la costa sur del Perú. El experimento tuvo como objetivo estimar la evapotranspiración del cultivo de olivo mediante el modelo METRIC, a partir de imágenes multiespectrales y térmicas tomadas desde un RPAS, previa calibración vicaria con diferentes tipos de cuerpos en campo y utilizando espectroradiómetro y radiómetro portátil. Se obtuvo valores medios para ET_c entre 2,86 y 2,94 mm d⁻¹, 4,02 mm d⁻¹ en invierno (floración) y 4,53 mm d⁻¹ en verano (fructificación); y valores de ETrF, en el rango de 0,88 a 1,67 y 0,92 a 1,42 mm d⁻¹ para invierno y verano respectivamente, habiendo diferencias significativas por estación. Los valores por encima de 1,0, con mayor variabilidad y ligeramente más altos en invierno, debido a un manejo de riego diario durante todo el año, para evitar tensiones abióticas debido a la salinidad del suelo.

Palabras clave: Olivo, evapotranspiración, espectroradiómetro, METRIC, imágenes multiespectral.

ABSTRACT

*In the present study, remote sensing techniques are used using a Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) to estimate crop evapotranspiration (ET_c) in olive trees (*Olea europaea* L.) on the southern coast of Peru. The objective of the experiment was to estimate the evapotranspiration of the olive cultivation by means of the METRIC model, from multispectral and thermal images taken from an RPAS, after vicarious calibration with different types of bodies in the field and using spectroradiometer and portable radiometer. Mean values for ET_c were obtained between 2.86 and 2.94 mm d⁻¹, 4.02 mm d⁻¹ in winter (flowering) and 4.53 mm d⁻¹ in summer (fruiting); and ETrF values, in the range of 0.88 to 1.67 and 0.92 to 1.42 mm d⁻¹ for winter and summer respectively, with significant differences by season. Values above 1.0, with greater variability and slightly higher in winter, due to daily irrigation management throughout the year, to avoid abiotic stresses due to soil salinity.*

Keywords: Olive tree, evapotranspiration, spectroradiometer, METRIC, multispectral imaging.

Introducción

Los olivares son cultivos perennes de gran importancia en el sector agrícola mundial; en el sur de Europa representan el 49% de la superficie cosechada de aceitunas; como primer país Grecia, seguido por España e Italia (Paço *et al.*, 2019). Mientras Argentina, Chile y Perú en América del

Sur son los mayores productores y están ubicados en latitudes subtropicales (<30°S) donde las altas temperaturas y pocas precipitaciones, afectan las necesidades anuales de los recursos hídricos (Torres *et al.*, 2017).

El Perú presenta alrededor de 28 000 ha de campos de olivos con una producción aproximadamente de 133 700 t, de las cuales el

¹ Departamento de Recursos Hídricos. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.

² Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Tacna, Perú.

³ Utah State University. Utah, USA.

* Autor por correspondencia: liarf@lamolina.edu.pe

75% se destina a aceitunas de mesa y el 25% restante se destina a aceite de oliva (Izaguirre-Malásquez *et al.*, 2022). La producción de aceitunas de mesa ha aumentado considerablemente durante la última década (Torres *et al.*, 2017). Ante la escasez hídrica en la región, es necesaria la evaluación de la productividad, siendo importante para la optimización en términos de cuantificación de las necesidades de agua del cultivo. Esta necesidad hídrica del cultivo depende de la evapotranspiración (ET), la cual se ve influenciada por variables climáticas como la temperatura del aire, velocidad de viento, radiación solar y humedad relativa, además de parámetros del cultivo como la altura de la vegetación, estado fenológico del cultivo, densidad de plantación, entre otras (Ramírez-Cuesta *et al.*, 2019).

Existen diversos métodos para estimar ET, como los métodos directos basados en lisímetros, Torre de flujo turbulento y sensores de humedad de suelo, los que brindan información específica y puntual de ET y no refleja la variabilidad espacial. Además, de su alto costo de instalación (Niu *et al.*, 2020; Ramírez-Cuesta *et al.*, 2019). Por lo tanto, los investigadores han desarrollado métodos como la teledetección basados en el balance de energía, específicamente, Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL), Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration (METRIC) y Two-Source Energy Balance (TSEB) (Allen *et al.*, 2011; Allen *et al.*, 2007; Bastiaanssen *et al.*, 1998; Niu *et al.*, 2020). Sin embargo, la principal limitación de las plataformas satelitales, son la falta de resolución espacial y la obtención de los datos en tiempo real y en la escala apropiada para el estudio a nivel de parcelas o huertos, que es importante para el su manejo específico; generando incertidumbre en la cuantificación de ciertas variables en la ecuación del balance energético (Ortega-Farías *et al.*, 2016). Por su lado, el uso de imágenes de alta resolución obtenidas a partir de RPAS proporcionan información espacial más detallada que puede incorporarse al modelo de balance de energía como el modelo METRIC. Según Ortega-Farías *et al.* (2016) y Ramírez-Cuesta *et al.* (2019), las imágenes de alta resolución permiten una mejor clasificación de superficie (suelo y planta) en campos heterogéneos, lo que se vería reflejado en la mejora del desempeño del modelo METRIC. Además, Nassar *et al.* (2021) y Torres-Rua *et al.*

(2020), enfatizan la importancia del tamaño de los píxeles que pueden ocasionar algunos errores en la estimación de la evapotranspiración; así también, como los procesos de calibración de las cámaras (multiespectrales y térmicas), la corrección geométrica y radiométrica de los datos de la imagen.

De acuerdo a lo anteriormente indicado y la necesidad de obtener información precisa sobre la estimación de la ETc de cultivo para una mejor gestión del riego de los olivares en una zona árida como es la irrigación La Yarada en Tacna, Perú, una región de escasos recursos hídricos donde el agua juega un papel decisivo en el desarrollo agrícola e impone la optimización del uso del agua de riego, los principales objetivos de este estudio fueron, (1) calibrar las bandas espectrales del sensor multiespectral y térmico mediante metodología vicaria; (2) estimar la evapotranspiración del cultivo de olivo mediante el modelo METRIC, a partir del uso de imágenes multiespectrales e imágenes térmicas montadas en un RPAS. Esta información será empleada como línea base y registros orientativos para los agricultores, productores e investigadores en la región con la finalidad de optimizar el uso del agua y mejorar la gestión del cultivo del Olivo.

Materiales y métodos

Zona de estudio

El área de estudio es un olivar de 3,19 ha, ubicado en la irrigación La Yarada, provincia y región Tacna, Perú (latitud: S18°10'55,37"; longitud: O 70°31'52.17"; 50 m.s.n.m.) (Figura 1). El clima es templado, desértico y con amplitud térmica moderada; en los meses de junio a agosto (invierno húmedo), donde abundan la neblinas o camanchacas, y el resto del año es semicálido, con temperaturas mínima y máxima de 13,6 °C y 24,6 °C, respectivamente (Pino *et al.*, 2019). Las precipitaciones son prácticamente nulas, típico comportamiento de regiones desérticas, con precipitación media acumulada anual de 33,4 mm, por lo cual es considerada una región con escasas lluvias y de clima seco, y forma parte de la cabecera del desierto de Atacama (Izaguirre-Malásquez *et al.*, 2022; Pino, 2019; Pino *et al.*, 2019).

El trabajo se llevó a cabo en dos campañas, vuelos los días, 7 de agosto del 2019 (DOY 258) en la estación de invierno y el 6 de marzo del

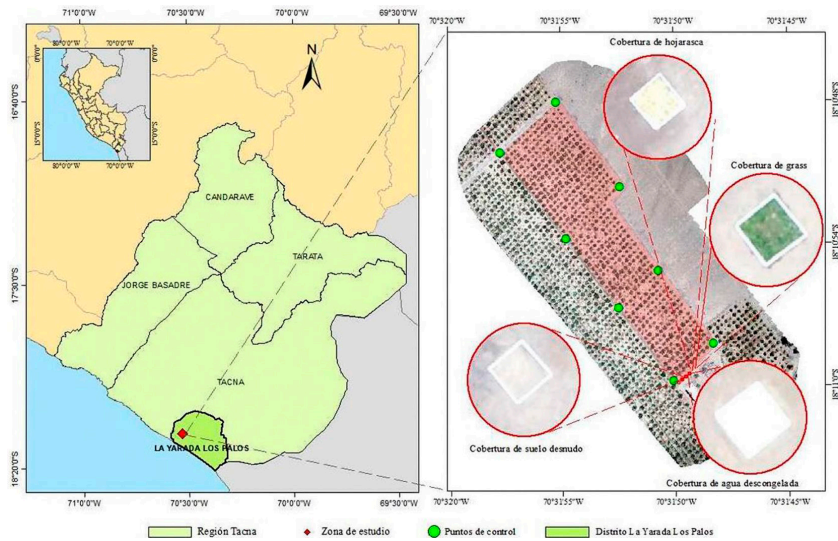


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio e imagen RGB del campo de olivo con imágenes de cobertura empleadas en la calibración de la cámara térmica.

2020 (DOY 65) en la estación de verano, con cultivo en fructificación y llenado de frutos. Se obtuvo información de tres bloques del cultivo de olivo con plantas con edad promedio de 22 años (Figura 2b), variedad Gordal Sevillana que cubría 96% del campo y el resto con la variedad Ascolana (árboles polinizadores). El campo contiene un total 580 árboles con un marco de plantación de 7 x 7 m que hacen una densidad de 200 árboles ha⁻¹. En la Figura 2a, se visualiza la distribución de

las variedades de olivo Sevillana y Ascolana. Los vuelos se realizaron en las etapas de crecimiento de brotes y desarrollo de fruto, según la escala BBCH (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt, Chemische Industrie) (Sanz-Cortés *et al.*, 2002). Además, el sistema de riego por goteo está constituido por laterales de Polietileno (PE) de 16 mm de diámetro, dos líneas de goteo por hilera de árboles, con distancia entre goteros de 0,40 m, caudal de 2 l h⁻¹ y presión de trabajo de 0,5 – 1,0

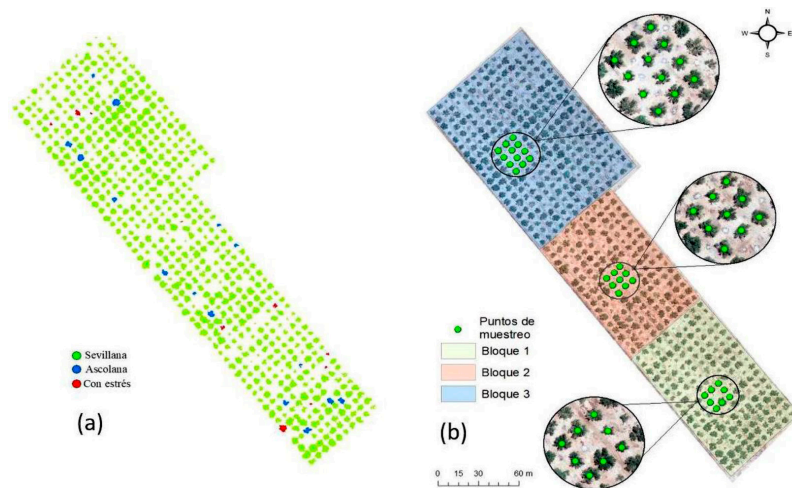


Figura 2 (a) Ubicación y distribución espacial del cultivo de olivo según variedades y árboles con estrés en el área del estudio. (b) Puntos de muestreo del LAI distribuido en tres bloques del campo del olivar.

bar. El agua de riego proviene del acuífero La Yarada, Conductividad Eléctrica (CE) de 1,35 mmhos/cm⁻¹, pH de 7,13 y Relación de Adsorción de Sodio (RAS) de 13,77, con clasificación C3-S3 “agua con problemas de salinidad”. El suelo es franco arenoso con densidad aparente de 1,65 g cm⁻³, la capacidad de campo y punto de marchitez fue de 11,03 y 5,31 g g⁻¹ respectivamente.

Recolección de información de campo

Las mediciones del índice de área foliar se realizaron con un ceptometer portátil ACCUPAR LP-80 (METER Group, Pullman, WA, USA), consta de una matriz lineal de 80 sensores independientes de radiación fotosintéticamente activa (PAR) y mide en el rango de longitud de onda de 400 a 700 nm y en unidades (μmol m⁻² s⁻¹), su función se basa en la cantidad de luz interceptada en el dosel del cultivo. El dispositivo se mantuvo aproximadamente a una altura de 2,5 m sobre el suelo y por debajo del sensor PAR a 10 cm del suelo, realizando mediciones en 27 árboles con cuatro repeticiones en cada uno de ellas y en tres áreas diferentes especificadas en la Figura 2. La metodología empleada corresponde a lo especificado por Kargar *et al.* (2019).

Equipos de teledetección

Sensor multiespectral

El sensor multiespectral a bordo del RPAS fue una Parrot Sequoia (Parrot S.A., Paris, France) de cuatro bandas multiespectrales: verde (550 nm), rojo (660 nm), borde rojo (735 nm) e infrarrojo cercano (790 nm), con obturador global de 1,2 MP y un sensor de luz solar que ajusta automáticamente las lecturas a la luz ambiental. Se realizó una calibración vicaria de las imágenes multiespectrales empleando un espectroradiómetro modelo TriOs - Ramses (TriOS Mess- und Datentechnik GmbH, Germany), sobre diferentes coberturas como: suelo desnudo, grass, hojarasca, entre otros.

Sensor térmico

El sensor térmico corresponde a una cámara FLIR Vue Pro R 640 fabricado por FLIR Systems (Wilsonville, EE.UU.), posee un microbolómetro no refrigerado que proporciona imágenes radiométricas

en formato JPEG y TIFF de 14 bits con una lente de 13 mm que registra en una banda espectral de 7,5-13,5 μm mediciones de temperatura en un rango de -20 °C a +50 °C y una sensibilidad térmica de 0,05 °C. Los valores de temperatura se calibraron a partir de un radiómetro infrarrojo, modelo Apogee MI-210 (Apogee Instruments, MI-210, Utah, EE.UU.), el registro de datos de coberturas que realizaron con marco de PVC de 1 x 1m.

Adquisición y preprocesamiento de imágenes.

Se utilizó un RPAS cuadricóptero, modelo DJI Matrice 210 (DJI, Shenzhen, China), equipado con tres sensores, cámara RGB, Zenmuse X4S (DJI, Shenzhen, China), multiespectral y térmica. El plan de vuelo para el RPAS se programó con la aplicación DJI GS Pro, a una velocidad de 6,3 m/s⁻¹, una altura de 85 m sobre el nivel del suelo, un traslape frontal de 85% y lateral de 80%. Se obtuvieron orthomosaicos multiespectrales y térmicos con una resolución espacial 9,2 cm y 11,8 cm, respectivamente. Para minimizar el ruido de sombras del dosel de la planta, las imágenes fueron capturadas entre las 11:00 a.m. a las 12:00 pm en condiciones de cielo despejado.

El preprocesamiento se realizó con el software Pix4Dmapper Pro (Pix4D S.A., Prilly, Switzerland) para la construcción de los orthomosaicos y modelos digitales de superficie (MDS). Para la calibración geométrica se requirió de ocho puntos de control distribuidos en el campo experimental, corrigiendo las imágenes RGB, multiespectrales y térmicas; también se realizó calibración radiométrica con la Sequoia diana de calibración.

Posteriormente, se empleó el Software ArcGIS, para homogenizar el tamaño de los píxeles a 12 cm mediante el remuestro de los orthomosaicos multiespectrales y térmicos. Además, se procedió a realizar una clasificación supervisada de las imágenes para obtener la máscara de vegetación para cada orthomosaico, separando el suelo y la sombra. A continuación, se estimó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) empleando las bandas espectrales RED y NIR, según la ecuación (1)

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

El Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), se empleó con el objetivo de minimizar

las alteraciones presentadas en los valores de NDVI, en zonas de escasa vegetación (Huete, 1988) mediante la ecuación (2).

$$SAVI = \frac{(1+L) \times (NIR - RED)}{(L + NIR + RED)} \quad (2)$$

Donde: L es una constante que varía entre 0 (zonas con alta densidad de vegetación) y 1 (zonas con densidad escasa), en el presente estudio se asumió un L de 0,5, valor que corresponde a un olivar intensivo (200 árboles ha⁻¹).

El Índice de Área Foliar (LAI) es la relación adimensional entre el área foliar total de la superficie por unidad de área del suelo; es un indicador de biomasa y la resistencia del dosel al flujo de vapor y se calcula utilizando la ecuación (3).

$$LAI = \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (3)$$

Donde: SAVI, es calculado en la ecuación (2) y las constantes 0,69, 0,59 y 0,91 son valores tomados de los estudios realizados por Allen *et al.* (2011).

Modelo METRIC

Según Allen *et al.* (2007), Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration (METRIC), es originalmente un modelo basado en imágenes de satélite que estima la ET mediante la aplicación de balance de energía superficial. Calcula ET como un residuo de la ecuación de balance energía superficial mediante el flujo de calor latente (LE) de la ecuación (4).

$$LE = R_n - G - H \quad (4)$$

Donde, R_n es la radiación neta (W m⁻²); G es el flujo de calor del suelo (W m⁻²); y H es el flujo de calor sensible (W m⁻²) (Allen *et al.*, 2011; Allen *et al.*, 2007). La radiación neta se calculó a partir del balance de radiación de la superficie terrestre, ecuación (5).

$$R_n = (1 - \alpha) \times R_s \downarrow + R_L \downarrow - R_L \uparrow - (1 - \epsilon_0) \times R_L \downarrow \quad (5)$$

Dónde $R_s \downarrow$ es la radiación de onda corta entrante (W m⁻²); α es el albedo superficial (Ramírez-Cuesta *et al.*, 2019; Tsouni *et al.*, 2008); $R_L \downarrow$ es la radiación de onda larga entrante (W m⁻²)

y $R_L \uparrow$ es la radiación de onda larga saliente (W m⁻²), respectivamente y ϵ_0 es la emisividad térmica de la superficie (adimensional). Los valores de $R_s \downarrow$, $R_L \uparrow$, $R_L \downarrow$ se obtiene según lo indicado por Bastiaanssen *et al.* (1998).

G representa el calor conducido al suelo y se calcula multiplicando el valor G/R_n por R_n , y se determina usando una ecuación empírica que se aplica en METRIC, la que se basa en las siguientes ecuaciones (6a y 6b).

$$G/R_n = 0,05 + 0,18e^{-0,521 \times LAI} \quad (LAI \geq 0,5) \quad (6a)$$

$$G/R_n = \frac{1,8 \times (T_s - 273,15)}{R_n} + 0,084 \quad (LAI < 0,5) \quad (6b)$$

Donde T_s es la temperatura de la superficie (K) y LAI (adimensional) es el índice de área foliar (Allen *et al.*, 2011), dependiente del Índice de Vegetación Ajustado del Suelo (SAVI) y calculado a partir de la banda roja y el infrarrojo cercano (Huete, 1988).

El flujo de calor sensible (H) es la tasa de pérdida de calor por el aire a través de la convección y conducción, se calcula a partir de la rugosidad de la superficie, velocidad del viento y la diferencia de temperatura de la superficie y el aire, mediante la ecuación (7) (Acharya y Sharma, 2021).

$$H = \rho_{air} \times C_p \times \frac{dT}{r_{ah}} \quad (7)$$

Donde ρ_{air} es la densidad del aire (kg m⁻³), C_p es el calor específico del aire a presión constante (J kg⁻¹ K⁻¹), dT (K) es la diferencia de la temperatura ($T_1 - T_2$) entre dos alturas (z_1 y z_2) de forma vertical a la superficie y r_{ah} es la resistencia aerodinámica (s m⁻¹) correspondiente a dT (Tasumi, 2019). Los parámetro r_{ah} y dt , se calcularon según lo indicado por Allen *et al.* (2011).

Procedimiento de la selección del pixel frío y caliente

En la selección del pixel frío y caliente se definieron condiciones límites para el equilibrio energético. Los pixeles están en función de la homogeneidad entre sus píxeles vecinos y la distancia a la estación meteorológica. La selección del píxel frío, se identificó específicamente en campos agrícolas y dentro de un área de interés, con valores de temperatura en el rango $\pm 0,2$ K

del promedio del 20% más frío de la temperatura superficial, extraído del área del 5% de los valores más altos de NDVI. Finalmente, se seleccionó el 1% (del 5% de los valores más altos de NDVI), siendo el pixel candidato final el promedio del 1%. Por lo contrario, la selección del pixel caliente, se identificó preferentemente en suelos desnudos sin vegetación. Los pixeles calientes se encontraban en el rango del $\pm 0,2$ K del promedio del 20% más caliente de la temperatura superficial, extraído del área del 10% de los valores más bajos de NDVI. La selección de los pixeles finales se da en función de la proximidad del valor promediado y la homogeneidad entre sus pixeles vecinos (Bhattarai *et al.*, 2017; Morton *et al.*, 2013).

ET instantánea (ET_{inst}), Fracción de ET de referencia (ET_oF) y Evapotranspiración a las 24 h (ET_{24}).

El flujo de calor latente representa el calor de la superficie instantánea, debido a la ET_c en el momento de captura de las imágenes; se calcula mediante la ecuación (8). Para la estimación de la ET instantánea (ET_{inst}) se aplica la siguiente ecuación:

$$ET_{inst} = \frac{3600 \times LE}{\lambda} \quad (8)$$

Donde ET_{inst} es la ET instantánea ($mm\ h^{-1}$), LE es el flujo de calor latente ($W\ m^{-2}$) y λ es el calor latente de vaporización ($J\ kg^{-1}$) o el calor absorbido, cuando un kilogramo de agua se evapora ($J\ kg^{-1}$) y se determina en función a la siguiente ecuación (Allen *et al.*, 2007):

$$\lambda = [2,501 - 0,00236(T_s - 27,15)] \times 10^6 \quad (9)$$

La fracción de ET de referencia (ET_o) se define como la relación entre la ET instantánea (ET_{inst}) para cada pixel y ET_o estimado mediante información meteorológica recopilada.

$$ET_oF = \frac{ET_{inst}}{ET_o} \quad (10)$$

Donde, ET_o es la ET de referencia para la alfalfa de 0,5 m de altura para el momento de la captura de la imagen. La ET_o fue calculada por el método de Penman Monteith ($mm\ h^{-1}$) con datos de la estación meteorológica automática.

El modelo METRIC calcula la ET_{24} en función a la multiplicación ET_oF y ET_{o-24} . Los valores de

ET_{24} diarios son más utilizados que la información brindada por ET_{inst} . (Allen *et al.*, 2007).

$$ET_{24} = ET_oF \times ET_{o-24} \quad (11)$$

Resultados y discusiones

Calibración vicaria de las imágenes multispectrales

La regresión lineal de las bandas de la cámara multispectral y los datos medidos por el espectroradiómetro (Tabla 1), mostraron una correlación de Pearson $r^2 > 0,82$ para las cuatro bandas (rojo, borde rojo, verde e infrarrojo cercano) y un RMSE promedio de 7%. Según Cubero-Castan *et al.* (2018), manifiesta que los cuerpos con valores de reflectancias superiores al 75%, representan una sobreestimación promedio por banda de un 8%, sin embargo, materiales naturales como la hoja de cultivo, no exhiben una reflectancia tan alta.

Calibración de imágenes térmicas

Los valores de la temperatura absoluta de la superficie, proporcionada por las imágenes radiométricas en formato RJPG de la cámara FLIR Vue Pro R 640, se calibraron mediante una correlación lineal entre los valores registrados a partir de un radiómetro infrarrojo modelo Apogee MI-210, sobre cuerpos conocidos como suelo desnudo, cobertura de hojarasca, cobertura de grass y agua descongelada, para las condiciones ambientales de la zona de estudio. Se obtuvo una ecuación de corrección ($Y_{radiómetro} = 1,10X_{cámara\ térmica} - 10,84$) con un coeficiente de Pearson (r^2) de 0,97 y el cuadrado medio del error (RMSE) de

Tabla 1. Ecuaciones de regresión lineal y coeficiente de determinación r^2 para la calibración de bandas rojo, borde rojo e infrarrojo cercano.

Ecuación	r^2
$Y_{rojo} = 0,67X_{rojo}$	0,95
$Y_{borde\ rojo} = 0,82X_{borde\ rojo}$	0,86
$Y_{verde} = 0,69X_{verde}$	0,94
$Y_{infrarrojo\ cercano} = 0,75X_{infrarrojo\ cercano}$	0,82

X = Banda original, Y= Banda corregida.

7 °C, indicando una buena correlación entre las temperaturas y las coberturas (Figura 3).

La selección de los píxeles extremos caliente y frío, para las fechas de trabajo de campo 2018 y 2019 (Tabla 2), muestra que los píxeles fríos corresponden a una temperatura superficial de (Ts) mínima de 284,4 y 294,4 K, valores máximos de NDVI en 0,89 y 0,95, LAI de 1,46 y 1,57 y el albedo superficial entre 0,20 y 0,18. El píxel caliente corresponde a temperaturas superficiales (Ts) de 303,3 y 325,8 K. valores mínimos de NDVI de 0,31 y 0,02, un LAI de 0,10 y 0,12. Las características anteriormente señaladas corroboran lo expuesto por Allen *et al.* (2011) y Morton *et al.* (2013), los que afirman que el proceso de verificación de los píxeles frío y caliente se realiza en áreas separas, es decir que el píxel frío es en coberturas vegetales

en campos agrícolas, mientras para el píxel caliente es en suelos desnudos sin vegetación.

En la Figura 4, se presenta la variación espacial de los componentes de balance de energía Rn, G, H y LE del 07 de agosto 2019 (invierno) y 06 de marzo 2020 (verano) con los valores que corresponden a los píxeles de vegetación que varían de 543,61 a 640 W m⁻² y 640 a 741 W m⁻² para Rn; de 19 a 60 W m⁻² y 10 a 70 W m⁻² para G; de 53 a 150 W m⁻² y 150 a 238 W m⁻² para H; de 455,14 a 584,44 W m⁻² y 342,86 a 600 W m⁻² para LE. Según Allen *et al.* (2011); Häusler *et al.* (2018) y Nassar *et al.* (2021), la Rn puede encontrarse entre 100 a 800 W m⁻² dependiendo de la variación diurna, alcanzando un valor mayor al medio día. Por otro lado, los valores para los demás componentes de balance de energía se muestran para G de 0 a

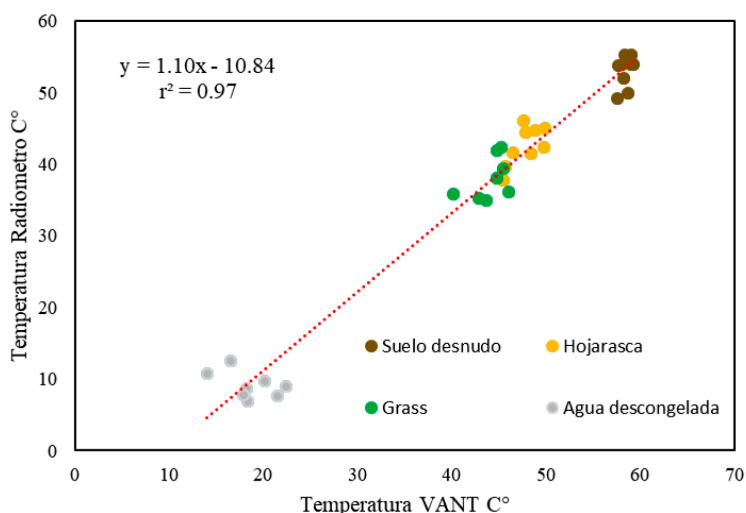


Figura 3. Relación entre las temperaturas registradas por un radiómetro y una cámara térmica montada en un UAV en diferentes cuerpos (agua descongelada, grass, hojarasca y suelo desnudo).

Tabla 2. Variables de selección del píxel frío y caliente para los vuelos RPAS.

Píxel	Coordenadas (WGS84, UTM)						
	X	Y	NDVI	Albedo	Ts(K)	a	b
07/08/2019 (invierno)							
Frío	338130,85	7988880,01	0,89	0,20	284,4	0,12	-30,34
Caliente	338033,91	7989149,97	0,31	0,16	303,3		
06/03/2020 (verano)							
Frío	338009,13	7989158,05	0,95	0,18	294,4	0,11	-30,37
Caliente	338107,22	7988910,43	0,02	0,21	325,8		

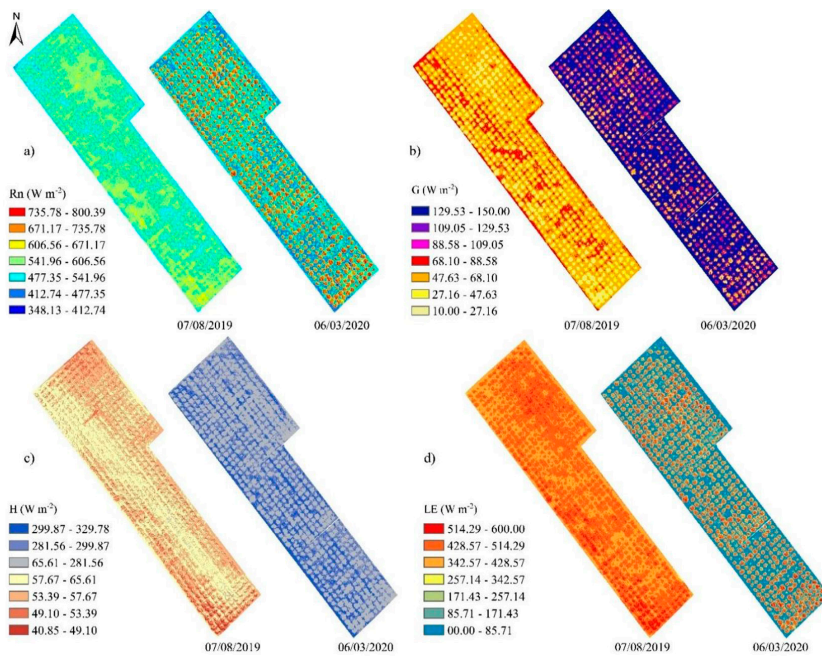


Figura 4 Distribución espacial de los componentes de energía Rn(a), G(b), H(c) y LE (d) con la variedad de olivo Sevillana y Ascolana y condición de estrés.

180 $W m^{-2}$ (Nassar *et al.*, 2021); H un valor de 50 a 400 $W m^{-2}$ (Acharya y Sharma, 2021) y LE de 0 a 650 $W m^{-2}$ (Nassar *et al.*, 2021; Ortega-Farías *et al.*, 2016). Sin embargo Häusler *et al.* (2018) y Nassar *et al.* (2021), dan a conocer que los componentes de balance de energía alcanzan sus mayores valores al medio día, además, que los valores pueden variar de forma horaria en los meses de las estaciones del año (verano, primavera, otoño e invierno) y obteniendo mayores valores en la estación de verano para los cultivos, especialmente en el Olivo. En la Tabla 3, se muestra el promedio, la desviación estándar y la variación para la estación de invierno 2019 y verano 2020

del cultivo del Olivo con un incremento de 18, 56 y 71% para Rn, G y H respectivamente, no obstante, se observa una disminución del 8% para LE en verano con respecto al invierno.

Evapotranspiración del cultivo diario (ETc)

En la Figura 5, se aprecia la variación espacial de la ET diaria, se obtuvo valores (\bar{x} , S) para invierno y verano, según condición de estrés y sin estrés (Tabla 4). De la estimación de la ETc del modelo METRIC en arboles sin estrés y con estrés se obtuvo valores \bar{x} de 2,94 y 2,87 $mm d^{-1}$, para la temporada de invierno, encontrándose en la etapa de floración

Tabla 3 Valores (\bar{x} , S) de los componentes del balance de energía (Rn, G, H y LE), según variedades y condición de estrés.

Detalle	Invierno			Verano		
	sin estrés		con estrés	sin estrés		con estrés
	Sevillana	Ascolana		Sevillana	Ascolana	
Rn (Wm^{-2})	566,1 ± 12,8	560,8 ± 11,0	559,8 ± 17,1	692,6 ± 14,5	686,1 ± 11,0	676,7 ± 15,8
G (Wm^{-2})	30,8 ± 4,2	31,7 ± 4,9	39,1 ± 7,0	70,4 ± 9,2	66,0 ± 10,5	92,2 ± 8,1
H (Wm^{-2})	58,7 ± 2,5	59,2 ± 2,7	58,7 ± 1,9	203,8 ± 8,2	207,3 ± 7,8	211,8 ± 9,5
LE (Wm^{-2})	476,6 ± 17,1	468,9 ± 16,4	466,8 ± 21,1	440,0 ± 21,7	433,7 ± 25,3	396,9 ± 25,8

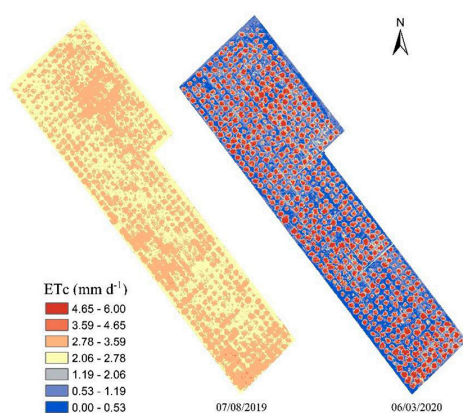


Figura 5. Distribución espacial de la evapotranspiración de cultivo (ETc) invierno y verano, mediante el modelo METRIC.

y 4,53 y 4,02 mm d⁻¹, para verano en la etapa de fructificación y llenado de fruto. Los valores de ETrF en olivo sin estrés y con estrés fueron de 1,23 y 1,20 mm d⁻¹, en invierno, y de 1,13 y 1,0 mm d⁻¹, en verano. Los valores de ETc estimados para verano son mayores en 30% con respecto a los de invierno. Además, los valores de ETrF ligeramente más altos en invierno, encontrándose valores de ETrF por encima de 1,0 debido al riego constante, para evitar las tensiones abióticas generadas por las sales del suelo y del agua de riego.

En la Figura 5 se visualiza el comportamiento de la evapotranspiración de referencia (ET₀) desde invierno 2019 (DOY 258) hasta el verano 2020 (DOY 65) con valores máximos y mínimos en verano e invierno respectivamente estimados a partir de diferentes métodos indirectos basados en componentes del balance de energía y datos climáticos.

En la Tabla 5, se presentan diferentes valores de ETc y ETrF estimadas a partir de diversos métodos y diferentes condiciones climáticas, suelo y de manejo agronómico. Al respecto, encuentran que al migrar de un sistema de secano a riego por goteo los valores de ET estimados fueron de 0,5 a 1 mm d⁻¹ debido a una mayor evaporación del suelo por mayor frecuencia de riego.

Los valores del ETrF están en el rango de 0,88 a 1,67 en invierno y 0,92 a 1,42 en verano. Los valores obtenidos entre la relación de la ETc por el modelo METRIC y la ET₀ obtenida por métodos indirectos, poseen mayor variabilidad y son más altos en invierno debido a un aumento de la evaporación del suelo producida por la alta humedad del aire captado de las camanchacas (Tabla 5). Al respecto Paço *et al.* (2019) indican que en invierno y otoño se presentan valores de ETrF > 1, debido a un aumento de la evaporación del suelo por la precipitación. Asimismo encuentran valores de ETrF > 1,5 en invierno que atribuyen a

Tabla 4. Valores (\bar{x} , S) de la ETc y ETrF según condición de estrés.

Detalle	Invierno		Verano	
	sin estrés	con estrés	sin estrés	con estrés
ETc (mm d ⁻¹)	2,94 ± 0,07	2,87 ± 0,13	4,53 ± 0,27	4,02 ± 0,33
ETrF	1,23 ± 0,27	1,20 ± 0,26	1,13 ± 0,14	1,00 ± 0,12

Tabla 5. Valores de ETc y ETrF.

Clasificación climática Köppen-Geiger	Sistema de riego	Tamaño de pixel (m)	Método para estimar ETc	ETc (mm/d ⁻¹)	ETrF	Zona de estudio	Referencia
Mediterráneo típico (Csa)	Secano 70% y goteo 30%	5 x 5	METRIC	1,74-5,27	0,31-0,81	España	Ramírez-Cuesta <i>et al.</i> (2019)
Mediterráneo típico (Csa)	Goteo	30 x 30	METRIC	0,90-6,00	0,40-1,20	Portugal	Paço <i>et al.</i> (2014)
Mediterráneo con influencia oceánica (Csb)	Goteo	30 x 30	Modelo de Wallace (SW)	1,34-3,69	–	Chile	Fuentes-Peñailillo <i>et al.</i> (2018)

una mayor humedad por causa de precipitaciones y los valores disminuyen hacia verano.

Conclusiones

Este estudio evalúa las imágenes multiespectrales y térmicas de alta resolución espacial mediante la calibración vicaria de los parámetros del modelo de balance de energía para la estimación del modelo METRIC en un área heterogénea de campos de olivos, con la finalidad de optimizar el uso del agua y mejorar la gestión del riego. Las calibraciones de las imágenes multiespectrales y térmicas son importantes para la implementación del modelo METRIC. Por lo tanto, la metodología de calibración vicaria empleada con diferentes coberturas arrojó un RSME de 7% para las imágenes multiespectrales y 7 °C para las imágenes térmicas, mostrando resultados confiables para la estimación de los componentes del modelo METRIC.

La estimación del α , LAI, NDVI y Ts fueron concordantes, habiéndose realizado la calibración de las bandas espectrales y térmicas, previas a la estimación de la ETc. Los componentes de balance de energía Rn, G, H y LE, mostraron valores aceptables dentro de los rangos establecidos, usando métodos directos e indirectos para el área de estudio en las diferentes estaciones del año.

Se obtuvo la ETc del cultivo del Olivo en invierno 2019 y verano 2020, mediante el modelo METRIC, los valores medios para ETc varían entre 2,86 y 2,94 mm d⁻¹, 4,02 mm d⁻¹ en invierno (floración) y 4,53 mm d⁻¹ en verano (fructificación); y valores de ETrf, en el rango de 0,88 a 1,67 y 0,92 a 1,42 mm d⁻¹ para invierno y verano respectivamente, registrándose diferencias significativas de acuerdo a la estación del año. Los resultados del modelo METRIC, muestran una alternativa importante para la estimación de la ETc, la información puede ser empleada para la gestión de riego más eficiente e identificación de árboles con estrés hídrico en los campos de olivo.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por fondos de canon, sobre canon y regalías mineras, IGIN, VIIN de la UNJBG en el marco del proyecto de investigación “Uso de Vehículos Aéreos no Tripulados para obtener la humedad del suelo en el olivo con fines de programación de riego en tiempo real en la Yarada Tacna Perú”.

Se agradece el apoyo de Utah State University en el proceso de capacitación del personal peruano afiliado a este proyecto.

Literatura Citada

- Acharya, B.; Sharma, V.
2021. Comparison of satellite driven surface energy balance models in estimating crop evapotranspiration in semi-arid to arid inter-mountain region. *Remote Sensing*, 13(9). DOI: 10.3390/rs13091822
- Allen, R.G.; Tasumi, M.; Morse, A.; Trezza, R.; Wright, J.L.; Bastiaanssen, W.; Kramber, W.; Lorite, I.; Robison, C.W.
2007. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC-Applications). *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4): 395-406.
- Allen, R.; Trezza, R.; Hendrickx, J.M.H.; Bastiaanssen, W.; Kjaersgaard, J.
2011. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. *Hydrological Processes*, 25(26): 4011-4027.
- Bastiaanssen, W.G.M.; Menenti, M.; Feddes, R.A.; Holtslag, A.A.M.
1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212-213 (1-16), 198-212.
- Bhattarai, N.; Quackenbush, L.J., Im, J.; Shaw, S.B.
2017. A new optimized algorithm for automating endmember pixel selection in the SEBAL and METRIC models. *Remote Sensing of Environment*, 196: 178-192.
- Cubero-Castan, M.; Schneider-Zapp, K.; Bellomo, M.; Shi, D.; Rehak, M.; Strechaand, C.
2018. Assessment of the radiometric accuracy in a targetless workflow using pix4d software. 2018 9th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS).
- Fuentes-Peñailillo, F.; Ortega-Farías, S.; Acevedo-Opazo, C.; Fonseca-Luengo, D.
2018. Implementation of a Two-Source Model for Estimating the Spatial Variability of Olive Evapotranspiration Using Satellite Images and Ground-Based Climate Data. *Water*, 10(3): 339.
- Häusler, M.; Conceição, N.; Tezza, L.; Sánchez, J.M.; Campagnolo, M.L.; Häusler, A.J.; Silva, J.M.N.; Warneke, T.; Heygster, G.; Ferreira, M.I.
2018. Estimation and partitioning of actual daily evapotranspiration at an intensive olive grove using the STSEB model based on remote sensing. *Agricultural Water Management*, 201 (January): 188-198.
- Huete, A.R.
1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25: 295-309.
- Izaguirre-Malasquez, R.; Muñoz-Gonzales, L.; Cabel-Pozo, J.; Raymundo, C.
2022. Inventory Optimization Model Applying the FIFO Method and the PHVA Methodology to Improve

- the Stock Levels of Olive Products in SMEs of the Agro-Industrial Sector in Peru. *Human Interaction, Emerging Technologies and Future Systems V. IHiet 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, 39. DOI: 10.1007/978-3-030-85540-6_93
- Kargar, A.R.; MacKenzie, R.; Asner, G.P.; van Aardt, J. 2019. A density-based approach for leaf area index assessment in a complex forest environment using a Terrestrial Laser Scanner. *Remote Sensing*, 11(15). DOI: 10.3390/rs11151791
- Morton, C.G.; Huntington, J.L.; Pohll, G.M.; Allen, R.G.; Mcgwire, K.C.; Bassett, S.D. 2013. Assessing Calibration Uncertainty and Automation for Estimating Evapotranspiration from Agricultural Areas Using METRIC. *Journal of the American Water Resources Association*, 49(3), 549-562.
- Nassar, A.; Torres-rua, A.; Kustas, W.; Alfieri, J.; Hipps, L.; Prueger, J.; Nieto, H.; Alsina, M.M.; White, W.; McKee, L.; Coopmans, C.; Sanchez, L.; Dokoozlian, N. 2021. Assessing daily evapotranspiration methodologies from one-time-of-day suas and ec information in the grapex project. *Remote Sensing*, 13(15). DOI: 10.3390/rs13152887
- Niu, H.; Hollenbeck, D.; Zhao, T.; Wang, D.; Chen, Y. 2020. Evapotranspiration estimation with small uavs in precision agriculture. *Sensors (Switzerland)*, 20(22): 1-28.
- Ortega-Farías, S.; Ortega-Salazar, S.; Poblete, T.; Kilic, A.; Allen, R.; Poblete-Echeverría, C.; Ahumada-Orellana, L.; Zuñiga, M., Sepúlveda, D. 2016. Estimation of energy balance components over a drip-irrigated olive orchard using thermal and multispectral cameras placed on a helicopter-based unmanned aerial vehicle (UAV). *Remote Sensing*, 8(8): 1-18.
- Paço, T.A.; Paredes, P.; Pereira, L.S.; Silvestre, J.; Santos, F.L. 2019. Crop coefficients and transpiration of a super intensive Arbequina olive orchard using the dual Kc approach and the Kcb computation with the fraction of ground cover and height. *Water (Switzerland)*, 11(2). DOI: 10.3390/w11020383
- Pino, E. 2019. El acuífero costero La Yarada, después de 100 años de explotación como sustento de una agricultura en zonas áridas: una revisión histórica. *Idesia*, 37(3): 39-45.
- Pino V.E.; Montalván D.I.; Vera M.A.; Ramos F.L. 2019. La conductancia estomática y su relación con la temperatura foliar y humedad del suelo en el cultivo del olivo (*Olea europaea* L.), en periodo de maduración de frutos, en zonas áridas. La Yarada, Tacna, Perú. *Idesia*, 37(4): 55-64.
- Pino, E.; Ramos, L.; Avalos, O.; Tacora, P.; Chavarri, E.; Angulo, O.; Ascencios, D.; Mejía, J. 2019. Factores que inciden en el agotamiento y la contaminación por intrusión marina en el acuífero costero de La Yarada, Tacna, Perú. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 10(5): 177-213.
- Ramírez-Cuesta, J.M.; Allen, R.G.; Zarco-Tejada, P.J.; Kilic, A.; Santos, C.; Lorite, I.J. 2019. Impact of the spatial resolution on the energy balance components on an open-canopy olive orchard. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74 (September 2018): 88-102.
- Sanz-Cortés, F.; Martínez-Calvo, J.; Badenes, M.L.; Bleiholder, H.; Hack, H.; Llacer, G.; Meier, U. 2002. Phenological growth stages of olive trees (*Olea europaea*). *Annals of Applied Biology*, 140(2): 151-157.
- Tasumi, M. 2019. Estimating evapotranspiration using METRIC model and Landsat data for better understandings of regional hydrology in the western Urmia Lake Basin. *Agricultural Water Management*, 226 (October), 105805. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.105805
- Torres-Rua, A.F.; Tielavilca, A.M.; Aboutalebi, M.; Nieto, H.; Alsina, M.M.; White, A.; Prueger, J.H.; Alfieri, J.G.; Hipps, L.E.; McKee, L.G.; Kustas, W.P.; Coopmans, C.; Dokoozlian, N. 2020. Estimation of evapotranspiration and energy fluxes using a deep-learning-based high-resolution emissivity model and the two-source energy balance model with sUAS information. *Proc. SPIE 11414, Autonomous Air and Ground Sensing Systems for Agricultural Optimization and Phenotyping V*, 10.
- Torres, M.; Pierantozzi, P.; Searles, P.; Cecilia Rousseaux, M.; García-Inza, G.; Miserere, A.; Bodoira, R., Contreras, C.; Maestri, D. 2017. Olive cultivation in the southern hemisphere: Flowering, water requirements and oil quality responses to new crop environments. *Frontiers in Plant Science*, 8 (October), 1-12.
- Tsouni, A.; Kontoes, C.; Koutsoyiannis, D.; Elias, P.; Mamassis, N. 2008. Estimation of actual evapotranspiration by remote sensing: Application in Thessaly plain, Greece. *Sensors*, 8(6): 3586-3600.

