



RESEARCH ARTICLE



Estimation of evapotranspiration from UAV high-resolution images for irrigation systems in rice fields on the northern coast of Peru

Estimación de la evapotranspiración a partir de imágenes de alta resolución de VANT para sistemas de riego en arrozales de la costa norte de Perú

Lia Ramos-Fernández^{1*} ; David Quispe-Tito¹ ; Lisette Altamirano-Gutiérrez¹ ; Camila Cruz-Grimaldo² ; Javier Alvaro Quille-Mamani³ ; Juan Pedro Carbonell-Rivera³ ; Jesús Torralba³ ; Luis Ángel Ruiz³ 

¹ Departamento de Recursos Hídricos, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima 15024. Perú.

² Dirección de Desarrollo Tecnológico Agrario, Instituto Nacional de Innovación Agraria. Lima. Perú.

³ Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Universitat Politècnica de València. España.

* Corresponding author: liarf@lamolina.edu.pe (L. Ramos-Fernández).

Received: 28 May 2023. Accepted: 12 January 2024. Published: 5 February 2024.

Abstract

In view of the growing scarcity of water for agriculture, the increase in food demand and future drought scenarios posed by climate change, it is essential to design new technologies that contribute to lower water consumption. In this research, high-resolution images have been used to estimate evapotranspiration in rice fields by applying the METRICTM (Mapping Evapotranspiration at High Resolution using Internalized Calibration) energy balance model. For this purpose, 5900 m² of crop were monitored under continuous flood irrigation (CF) and 2600 m² under alternate wetting and drying irrigation (AWD), in addition to some plots with lateral filtration. Ten flights were conducted between tillering and flowering phases, five flights with a Matrice 210 UAV equipped with a Parrot Sequoia multispectral camera, and five flights with a Matrice 300 RTK equipped with a H20T thermal camera. Field data were collected from vegetation indices (NDVI and LAI), and readings from a radiometer, to adjust information from multispectral and thermal images, respectively, and to obtain the components of the surface energy balance. Mean values for crop evapotranspiration (ETc) of 6.34 ± 1.49 and 5.84 ± 0.41 mm d⁻¹ were obtained for IC irrigation and AWD irrigation, respectively, obtaining a water saving of 42% with a yield reduction of 14%, providing a guide for proper irrigation management, however, it is suggested to use the model to optimize yield by obtaining critical thresholds for optimal application of AWD in the face of water resource scarcity.

Keywords: *Oryza sativa*; alternating wetting and drying; water stress; energy balance; unmanned aerial vehicle; remote sensing.

Resumen

Ante la creciente escasez del agua para la agricultura, el incremento de la demanda de alimentos y los futuros escenarios de sequía que nos plantea el cambio climático es indispensable diseñar nuevas tecnologías que contribuyan a un menor consumo de agua. En esta investigación se han empleado imágenes de alta resolución para estimar la evapotranspiración en arrozales aplicando el modelo de balance de energía METRICTM (Mapping Evapotranspiration at High Resolution using Internalized Calibration). Para ello, se monitorizaron 5900 m² de cultivo bajo riego por inundación continua (IC) y 2600 m² bajo la técnica de riego de alternancia humedecimiento y secado (AWD, por sus siglas en inglés), además de algunas parcelas con filtración lateral. Se realizaron 10 vuelos entre las etapas de macollamiento y floración, cinco vuelos con un VANT Matrice 210 con una cámara multispectral Parrot Sequoia, y cinco vuelos con un Matrice 300 RTK equipado con una cámara térmica H20T. Se colectó información de campo de los índices de vegetación (NDVI e IAF), y lecturas de un radiómetro, para ajustar información de las imágenes multiespectrales y térmicas, respectivamente; y obtener los componentes del balance de energía en superficie. Se obtuvo valores medios para evapotranspiración del cultivo (ETc) de 6,34 ± 1,49 y 5,84 ± 0,41 mm d⁻¹ para riego IC y riego AWD, respectivamente, obteniéndose un ahorro de agua del 42% con una reducción del rendimiento en 14%, proporcionando una guía para la gestión adecuada del riego, sin embargo, se sugiere utilizar el modelo para optimizar el rendimiento obteniendo umbrales críticos para la aplicación óptima de AWD frente a la escasez del recurso hídrico.

Palabras clave: *Oryza sativa*; alternancia humedecimiento y secado; estrés hídrico; balance de energía; vehículo aéreo no tripulado; teledetección.

DOI: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2024.001>

Cite this article:

Ramos-Fernández, L., Quispe-Tito, D., Altamirano-Gutiérrez, L., Cruz-Grimaldo, C., Quille-Mamani, J. A., Carbonell-Rivera, J. P., Torralba, J., & Ruiz, L. A. (2024). Estimación de la evapotranspiración a partir de imágenes de alta resolución de VANT para sistemas de riego en arrozales de la costa norte de Perú. *Scientia Agropecuaria*, 15(1), 7-21.

1. Introducción

El arroz es uno de los principales cultivos de cereales en el mundo (Fornasiero et al., 2022; Rahman et al., 2022), que mantiene la demanda nutricional y la seguridad alimentaria del 50 % de la población mundial (Jiang et al., 2019; Rahman et al., 2022). Anualmente son sembradas aproximadamente 160 millones de hectáreas que producen 750 millones de toneladas de arroz, previéndose un aumento del 28% de la demanda al 2050 (Jiang et al., 2019). Recientemente, el incremento de la población mundial ocasionó un aumento en la demanda de agua para la producción de alimento (Ouda & Zohry, 2022). Además, la Organización de las Naciones Unidas para Alimentación y la Agricultura (FAO), estimó la escasez del suministro de agua que presentan al menos 4 mil millones de personas en el mundo durante un mes al año (Hussain et al., 2022). Para 2025, la FAO ha proyectado que el 20% de los campos de arroz irrigados presentarán escasez de agua y además el 29% puede padecer de escasez económica de agua (Ishfaq et al., 2020). Por otro lado, el cambio climático está ligado directamente al agua, provocando alteraciones en el ciclo hidrológico, causando una distribución irregular de las precipitaciones y el aumento de la temperatura es diferentes partes del mundo, ocasionando mayores pérdidas en evaporación y evapotranspiración de los cultivos, reflejando un aumento de la necesidad de los recursos hídricos, siendo esto crítico ante escenarios futuros de sequía (Roy et al., 2022; Ouda & Zohry, 2022; Zobeidi et al., 2022).

El Perú se encuentra entre uno de los países que presenta escasez de agua media a alta (20% – 40%), según la relación de extracción y disponibilidad del recurso hídrico en el mundo (Hussain et al., 2022). Sin embargo, uno de sus principales cultivos demandantes de agua es el arroz, con un consumo de 12000 m³ ha⁻¹ y 20000 m³ ha⁻¹ en la costa del Perú (Neira et al., 2020). Además, el consumo per cápita anual por persona es de 63,5 kg de arroz, se siembran 4175970 m² en las que se producen 3436637 t, con un rendimiento promedio de 0,00082 t m⁻² (FAOSTAT, 2023). En este sentido, la costa norte de Perú (Piura, Lambayeque y La Libertad), dominadas por planicies costeras áridas, aproximadamente se siembran 715000 m² con una producción de 1017267 t para el periodo del 2021 (FAOSTAT, 2023).

El cambio climático está afectando la producción del arroz, debido al aumento de calor (alta temperatura y humedad), de los periodos de sequía, y de la salinidad (Ouda & Zohry, 2022; Zobeidi et al., 2022). La necesidad de ahorro de agua en arrozales ha fomentado que se investiguen

variedades que necesiten un aporte hídrico menor y además optando planificaciones prácticas para un uso más eficiente del agua, como la técnica de riego, alternancia de humedecimiento y secado (AWD), evapotranspiración (ET), trasplante en suelo no encharcado, cultivo en suelo saturado, sistema de camas elevadas, sistema de arroz aeróbico, siembra directa en seco (Ishfaq et al., 2020; Cheng et al., 2022). La técnica AWD se basa en la alternancia de fases de inundación y secado del suelo a partir las etapas de macollamiento hasta de llenado de grano (Mote et al., 2022; Cheng et al., 2022) e implica un constante monitoreo del estado del cultivo durante la fase de secado, ya que la falta de riego puede provocar estrés hídrico en la planta, reduciendo de rendimiento (De la Cruz et al., 2022; Mote et al., 2022; Gao et al., 2023). Se han realizado muchos esfuerzos para promover la AWD. Adoptado principalmente por los países asiáticos. Por ejemplo, China posee el 41% de sus campos de arrozales irrigados por AWD, luego se encuentra Tailandia, Bangladesh, Vietnam y Filipinas (Chu et al., 2018; Ishfaq et al., 2020; Cheng et al., 2022; Yu et al., 2023).

La ET estima el requerimiento de agua en los cultivos; puede obtenerse utilizando ecuaciones empíricas o algoritmos de detección remota, además de métodos tradicionales de medición como los lisímetros, sensores de humedad y torres de flujo turbulento. Sin embargo, poseen un elevado costo, adquisición e instalación y ofrecen información puntual a escala local y para un cultivo en específico (Niu et al., 2020; Saha et al., 2022). Con la implementación de los sensores remotos, se dispone de información continua de diversas imágenes dentro del rango del espectro electromagnético, que permite caracterizar la fenología del cultivo, suelo, agua y entre otros (Saha et al., 2022). El uso de sensores remotos y el balance de energía en la superficie permite estimar la ET.

El modelo METRICTM (Mapping Evapotranspiration at High Resolution using Internalized Calibration) (Allen et al., 2007), calcula la ET como un residual en el balance de la energía de la superficie y es una variante del SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), que es un algoritmo basado en un proceso de balance de energía (Bastiaanssen et al., 1998). Inicialmente utilizado con información de satélite de bajo costo; sin embargo, la principal limitación es la falta de resolución espacial para estudios a nivel parcelario, la presencia de nubosidad atmosférica e insuficientes datos en tiempo real (Niu et al., 2020). Por lo tanto, genera incertidumbre en la cuantificación de ciertas variables de la ecuación del balance energético.

En consecuencia, se ha desarrollado una nueva tecnología como la utilización de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) a la necesidad de obtener imágenes de alta resolución, sin errores atmosféricos y adquisición de imágenes en tiempo real; permitiendo la monitorización de cultivos homogéneos; sin embargo, el procesamiento de las imágenes requiere una mayor capacidad computacional que requiere ser evaluada (Pintér et al., 2022). Con esta tecnología se han realizado investigaciones en diferentes cultivos alrededor del mundo, por ejemplo: viñedos en Estados Unidos (Nassar et al., 2021), cebada en Dinamarca (Hoffmann et al., 2017), olivo en Chile (Ortega-Farías et al., 2016), olivo en España (Ramírez-Cuesta et al., 2019) y entre otros. Esta investigación tuvo como objetivo proponer un sistema del riego con menor consumo de agua en arrozales a partir de la estimación de la evapotranspiración obtenida de imágenes derivadas de un VANT, para proporcionar una guía en la gestión adecuada del riego en la costa norte del Perú.

2. Metodología

2.1 Área de estudio

El estudio se enmarca en un área total de 12400 m² con arrozales de la variedad INIA 508- Tinajones con un marco de plantación de 0,20 m x 0,20 m y tres condiciones de riego: (i) riego por inundación continua (IC) (5900 m²), ii) riego con alternancia de humedecimiento y secado (AWD) (2600 m²), y (iii) riego por filtraciones laterales (FL) (3900 m²), ubicado en el sector de riego Overazal, distrito de Chongoyape, región Lambayeque, Perú, con una altitud de 211 m.s.n.m. y un clima árido y templado (Figura 1).

Se realizó en un periodo de seis meses, entre agosto del 2021 a enero del 2022, presentando temperatura mínima y máxima de 19 °C y 31 °C, respectivamente, humedad relativa máxima de 94% y precipitación de 16,44 mm, obtenidos de la estación meteorológica Tinajones del SENAMHI.

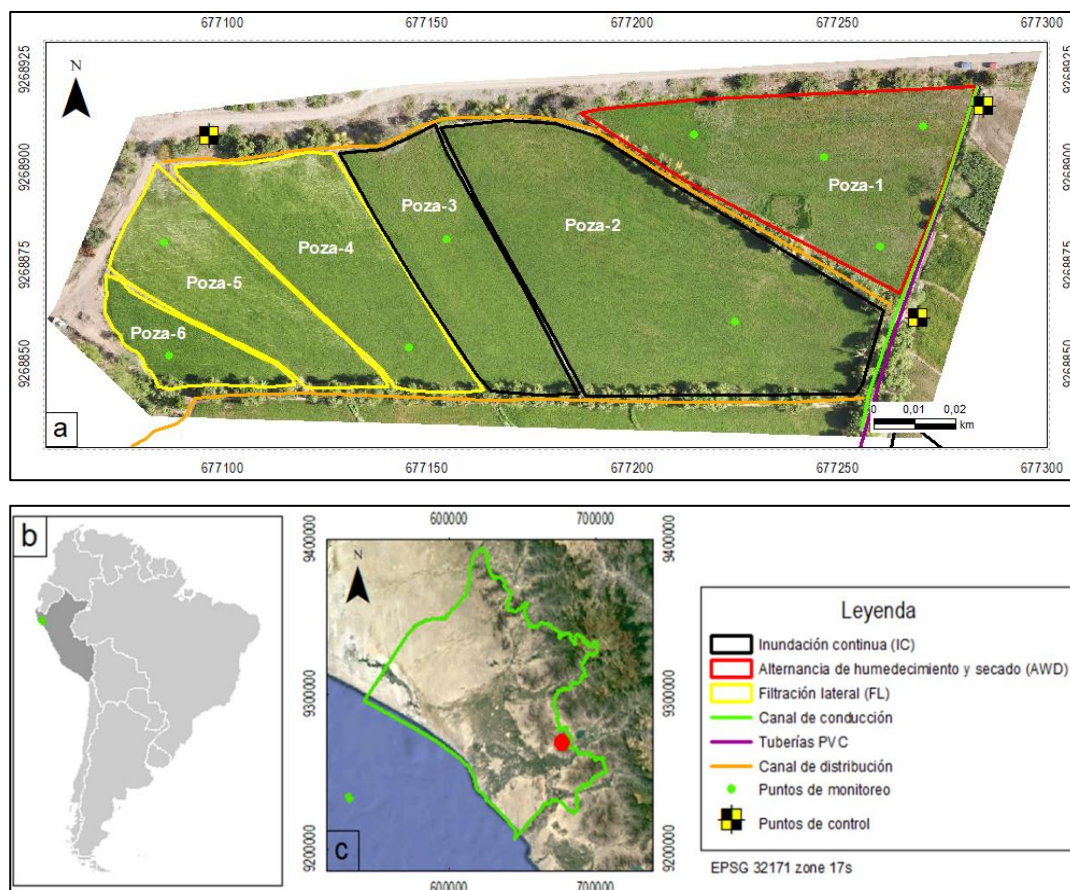


Figura 1. Ubicación del área de estudio. (a) Distribución de parcelas según sistema de riego, (b) Ubicación del área de estudio en la costa norte del Perú, (c) Imagen satelital del distrito de Chongoyape. El sistema de referencia es EPSG:32171. La imagen se obtuvo a partir de vuelos de VANT.

Según Köppen registra un clima seco árido cálido. El suelo es franco arcilloso (28% arcilla, 48% arena, 24% de limo), conductividad eléctrica (CE) de 0,406 dS/m, potencial de hidrógeno (pH) de 7,51, capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 12 meq/100 g, relación carbono/ nitrógeno (C/N) < 0,08, materia orgánica de 2,26%, nitrógeno total de 1287 mg kg⁻¹, fósforo disponible de 20,7 mg·kg⁻¹, boro < 0,50 mg·kg⁻¹, densidad aparente de 1,65 g·cm⁻³, capacidad de campo de 0,35 cm³·cm⁻³ y porosidad del 45,28%.

2.2 Sistema de riego

Se tuvieron tres sistemas de riego (IC, AWD, y FL). El AWD se realizó entre los estadios de macollamiento y botoneo (Figura 2). En IC se realizaron 15 riegos distribuidos: uno en almacigo, tres en fase vegetativa, siete en fase reproductiva y cuatro en fase de maduración, con una duración de 4 a 5 horas por riego; para AWD se aplicó nueve riegos, reduciéndose a: uno en fase vegetativa y cuatro en la fase reproductiva; y en FL no se realizó riego directamente, sino recibió filtración lateral (FL) de la poza 4 adyacentes (Rahman et al., 2022).

Se identificó la fenología de acuerdo a los grados días de calor (GDD) en base a las ecuaciones (1) y (2), índice útil para la identificación del crecimiento del cultivo (Porras et al., 2020):

$$GDD = T_a - T_{c-min}, T_a > T_{c-min} \quad (1)$$

$$GDD = 0 < T_{c-min} \quad (2)$$

Donde, T_a es la temperatura media del aire; T_{c-min} es el umbral mínimo de temperatura del cultivo, a partir del cual no se produce desarrollo vegetal.

La fuente de agua de riego proviene del canal que abastece al reservorio Tinajones; y tiene las siguientes características químicas: CE de 221 $\mu\text{S cm}^{-1}$, pH de 7,6, cationes (Ca^{2+} de 1,96; Mg^{2+} < 0,31; Na^+ de 0,18; K^+ de 0,0,07) meq l⁻¹, aniones (Cl^- < 0,3; NO_3^{2-} < 0,16; SO_4^{2-} de 0,48) meq l⁻¹. Según U.S. Soil Salinity Laboratory la clasificación del agua de riego es de tipo C1-S1, debido al bajo contenido de sodio y escasa salinidad del agua, con una relación de absorción de sodio (RAS) de 0,169.

El volumen de agua aplicado se estimó con el caudal y tiempo de riego, medido en el canal de distribución, con el método de la velocidad media (flotador) y área transversal al flujo. Para analizar los efectos del sistema del riego, se estimó la variación en: el consumo de agua (ΔCA) (Ecuación 3), el rendimiento (ΔY) (Ecuación 4), y la eficiencia de uso de agua (ΔEUA) (Ecuación 5), entre AWD y IC (Cheng et al., 2022).

$$\Delta\text{CA} = \left(\frac{\text{CA}_{\text{AWD}} - \text{CA}_{\text{IC}}}{\text{CA}_{\text{IC}}} \right) \quad (3)$$

$$\Delta\text{Y} = \frac{\text{Rendimiento}_{\text{AWD}} - \text{Rendimiento}_{\text{IC}}}{\text{Rendimiento}_{\text{IC}}} \quad (4)$$

$$\Delta\text{EUA} = \left(\frac{\text{EUA}_{\text{AWD}} - \text{EUA}_{\text{IC}}}{\text{EUA}_{\text{IC}}} \right) \quad (5)$$

Donde, las unidades de medida para CA son m³·ha⁻¹, para Y son kg·ha⁻¹ y para EUA son kg·m⁻³.

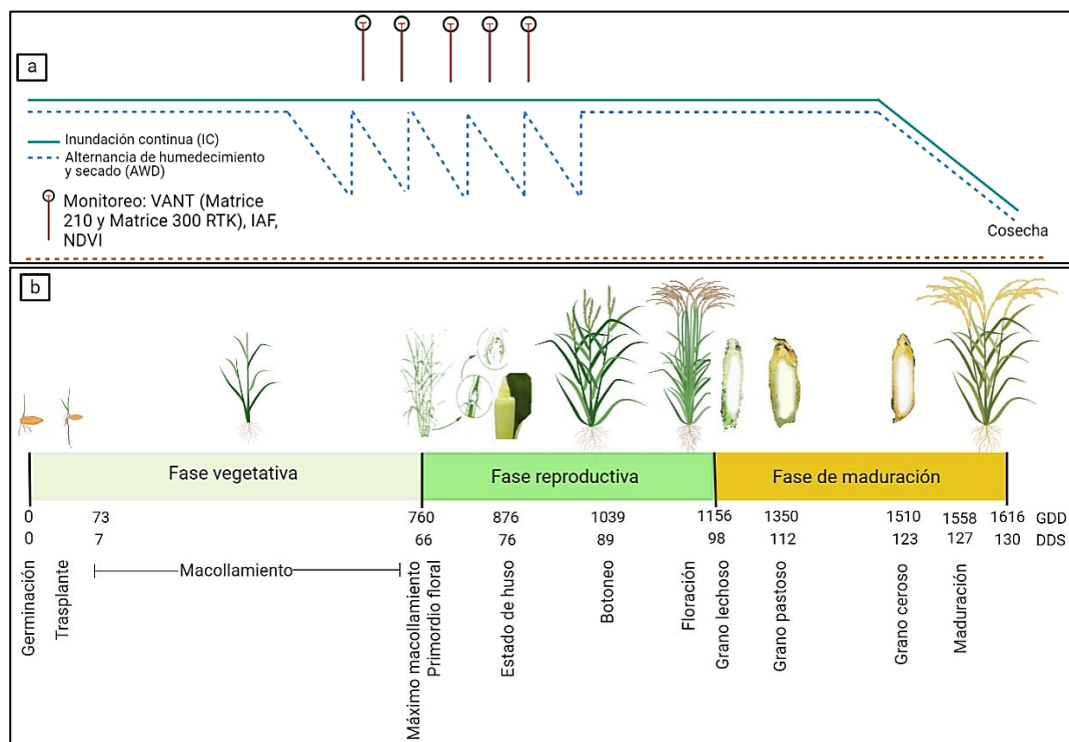


Figura 2. (a) Sistema del riego con inundación continua (IC), y riego de alternancia de humedecimiento y secado (AWD), (b) Fenología de acuerdo a los días después de la siembra (DDS) y grados días de calor (GDD).

2.3 Estimación de la evapotranspiración

La **Figura 3** representa el procedimiento secuencial para la estimación de la evapotranspiración del cultivo (ETc). Se emplearon dos VANTs (1) para coleccionar imágenes multispectrales (2), RGB (3) y térmicas (4), a partir del cual se estimaron los albedos (5), e índices de vegetación como, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) (6,7), el Índice de Área Foliar (IAF) (8), previamente ajustados con información de campo.

El modelo digital de terreno (MDT) (9) se estimó del ortomosaico RGB. Se coleccionó información climática (10) como humedad relativa (HR) (11) y otras variables climáticas (16) como temperatura del aire (Ta), velocidad del viento (V), altura de césped (h), evapotranspiración de referencia (ETo). Se estimó la temperatura superficial (12), ajustada con información de campo (13). Con la información del MDT se calculó la presión atmosférica (P)(17), y luego la densidad del aire (ρ_{air}) (18). La información climática permitió calcular la resistencia aerodinámica (rah) (19); y en el caso del flujo de calor sensible del aire (H)(22), se calculó el diferencial de temperatura (dT) (21) a partir de la identificación de valores umbrales

llamados pixel frío y caliente (20). Con los datos previos, se estimaron los componentes del balance de energía como la radiación neta (Rn) (14), el flujo de calor del suelo (G)(15), (H)(22) y el flujo de calor latente (LE) (23). En última instancia, se estimó la fracción de evapotranspiración de referencia (ETrF) (24) y la ETc (25).

2.3.1. Vehículo aéreo no tripulado (VANT)

Se realizaron los monitoreos aéreos con dos cuadrópteros (i) Matrice 210 con cámara multispectral Parrot Sequoia (Parrot S.A., París, France) y (ii) Matrice 300 RTK (DJI, Shenzhen, China) con cámara térmica DJI Zenmuse H20T (DJI, Shenzhen, China); con cinco vuelos por VANT, haciendo un total de 10 vuelos. La cámara multispectral capturó 1 000 imágenes aproximadamente entre todos los sensores, con calibración sobre un panel de reflectancia llamada panel de reflectancia (AIRNOV). La cámara térmica capturó 694 imágenes térmicas y ópticas (RGB, TIF radiométrico). Mayores detalles de las características de los sensores se indican en la **Tabla 1**, y características del plan de vuelo en la **Tabla 2**.

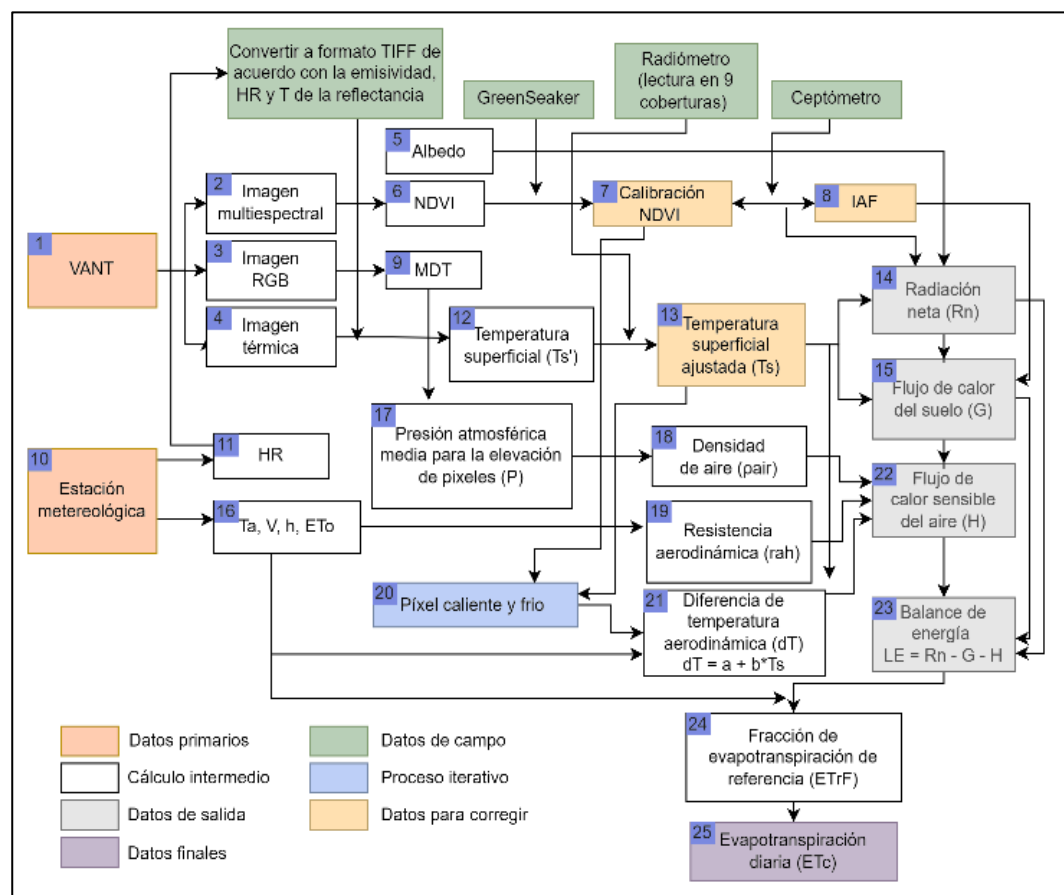


Figura 3. Procedimiento secuencial para la estimación de la evapotranspiración. Siendo temperatura del aire (Ta), velocidad del viento (V), altura de césped (h), humedad relativa (HR), evapotranspiración de referencia (ETo).

Tabla 1
Característica de los sensores de las cámaras VANT

VANT	Cámara	v (m s ⁻¹)	Traslape frontal y lateral	Tiempo de captura (s)	Tiempo de vuelo (min)	Tamaño del píxel (cm/píxel)
Matrice 210	Parrot Sequia	7,4	85/80 (multiespectral)	1,6	10	12,4
Matrice 300 - RTK	Zenmuse H20T	3,4	75/75 (térmica) 90/60 (RGB)	1	30	8,9 3,2

Tabla 2
Características del plan de vuelo. Plan de vuelo (altura de 100m, hora de vuelo: entre las 11:00 am y 13:00 pm*)

VANT	Sensores	Imágenes	Banda espectral (nm)/ precisión	Distancia focal (mm)	Resolución
Matrice 210	Parrot Sequoia	Multiespectral	Verde (550±40), Rojo (660±40), Borde rojo (735± 10), Infrarojo cercano (790±40)	3,98	1280 x 960
Matrice 300 RTK	Zenmuse H20T	Térmico	8000-14000/ (± 0,2 m + D × 0,15 %) D es la distancia a una superficie vertical	13,5	640 x 512
		RGB		4,5	4056 x 3040

* Para minimizar el sombreado, bajo condiciones de cielo despejado y con un viento ligero.

Los valores de temperatura de las imágenes térmicas se calibraron con información de un radiómetro Apogee MI-210 (Apogee Instruments, MI-210, Utah, Estados Unidos) sobre nueve coberturas conocidas (aluminio, vegetación muerta, vegetación viva, poliestireno expandido, tela amarilla, tela negra, tela roja, tela verde y suelo desnudo) enmarcadas en un cuadrado de PVC de 1 m x 1 m (largo y ancho). La medición se realizó a una altura de 40 cm, colectándose un total de 81 lecturas por día de vuelo, haciendo un total de 405 lecturas.

En la calibración de las imágenes térmicas, se obtuvo una ecuación de corrección por día de vuelo (Figura 4), además se generó una ecuación general ($Y_{radiómetro} = 0,8061 \cdot X_{H20T} + 14,667$) cuyo coeficiente

de determinación (R^2), coeficiente de Pearson (r) y error cuadrático medio (RMSE) fueron de 0,953, 0,976 y 12,77, respectivamente. Estos resultados indican una buena correlación entre las temperaturas de la cámara térmica H20T y el radiómetro Apogee MI-210, mejor al obtenido por Torres-Rua (2017), quien relacionó imágenes térmicas colectadas con un VANT y datos registrados en campo con un radiómetro.

Se georreferenciaron ocho puntos de control en suelo, empleando el equipo de prospección GNSS del D-RTK 2, con una precisión de ±1 cm + 1 ppm y ±2 cm + 1 ppm, en horizontal y vertical, respectivamente (ppm = por cada 1 km de aumento en la distancia, la precisión será 1 mm menos).

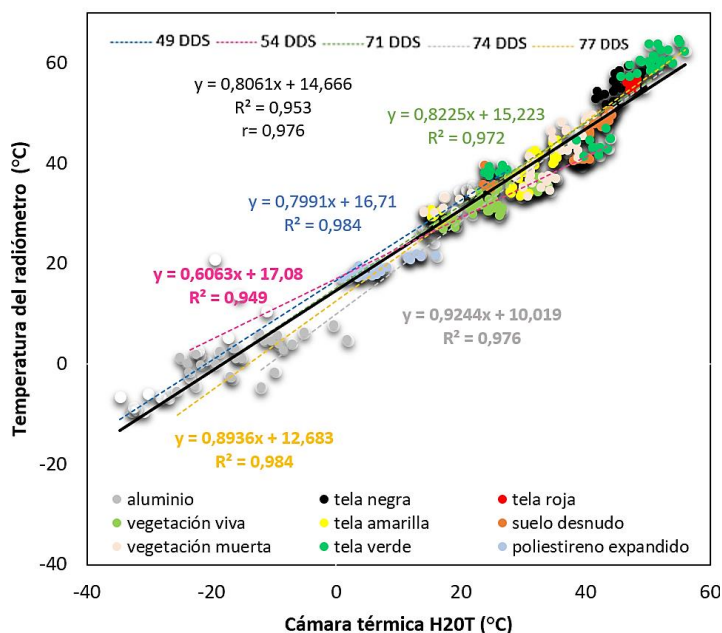


Figura 4. Relación entre las temperaturas registradas por el radiómetro Apogee MI-210 y cámara térmica H20T.

2.3.2. Medición en campo de NDVI y IAF

Se instalaron nueve puntos de muestreo distribuidos en seis pozas, identificadas con varillas de acero de 1,5 m y en la parte superior, un cilindro de poliestireno expandido de 0,50 m de diámetro y 0,10 m de altura cubiertas de papel aluminio. En estos nueve puntos se realizaron mediciones específicas sobre el NDVI, IAF y rendimiento del cultivo.

La medición del NDVI se realizó con el reflectómetro portátil GreenSeeker™, marca Trimble, coleccionando la lectura a una altura de 60 cm sobre las plantas de arroz. La medición del IAF se realizó con un ceptómetro portátil ACCUPAR LP-80 (METER Group, Pullman, WA, USA) que consta de una matriz lineal de 80 sensores independientes de radiación fotosintéticamente activa (PAR) y un sensor externo, con lecturas en el rango de longitud de onda de 400 a 700 nm en unidades de $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y precisión $\pm 5 \%$; mide la cantidad de luz interceptada en el dosel del cultivo. El sensor PAR se mantuvo debajo de las plantas de arroz y el sensor externo a una altura de 60 cm sobre las plantas de arroz. Asimismo, se registró cuatro mediciones por punto de muestreo, con un total de 36 datos por fecha de registro, haciendo un total de 180 datos para el sensor NDVI y IAF.

Se obtuvo el ajuste lineal del NDVI medido en campo y estimado con imágenes multiespectrales a todas las fechas de monitoreo, generándose ecuaciones de correlación para cada día de vuelo para la relación NDVI ($Y_{NDVI \text{ green_seeker}} = m \cdot X_{NDVI \text{ CAMARA H20T}} + n$) (Figura 5a). En la relación IAF y NDVI, se obtuvo una relación lineal para cada día de vuelo ($X_{IAF \text{ ceptómetro}} = m \cdot Y_{NDVI \text{ corregido}} + n$) (Figura 5b), relaciones

específicas para las condiciones climáticas locales y del dosel del cultivo que se encontraba entre macollamiento y estado de huso.

Al respecto, **Sisheber et al. (2022)** obtienen una relación lineal del IAF (ceptómetro) con NDVI estimados de imágenes LANDSAT ($R^2 = 0,45$). Por otro lado, **Mendoza et al. (2017)** indican que las mediciones del IAF con ceptómetro en el cultivo de ají (*Capsicum annum*) en invernadero y IAF obtenido por método destructivo, pueden llegar a tener un R^2 de 0,99.

2.3.3. Preprocesamiento de las imágenes VANT

El preprocesamiento de las imágenes se realizó con el software fotogramétrico Pix4Dmapper Pro (Pix4D S.A., Prilly, Switzerland), principalmente tres procedimientos estándares (alineación de fotos, generación de nube de puntos y generación de ortomosaicos con modelos digitales de superficie (MDS), la secuencia de levantamiento y generación de mosaicos de las imágenes de un VANT) (**Río et al., 2019**). El software presenta plantillas para generar mosaicos con imágenes RGB, imágenes multiespectrales, imágenes térmicas y modelos en 3D; por ello el programa tiene un registro de modelo de cámaras, de cuales reconoce los formatos de las imágenes capturadas permitiéndole procesarlas.

Se generaron ortomosaicos de las imágenes RGB, multiespectrales y térmicas, respectivamente; luego se homogenizó la resolución a 14 cm/píxel por el método resample, y se realizó una clasificación supervisada (máxima verosimilitud) de las imágenes mediante el software ArcGIS 10,4 para obtener la máscara de vegetación por cada ortomosaico.

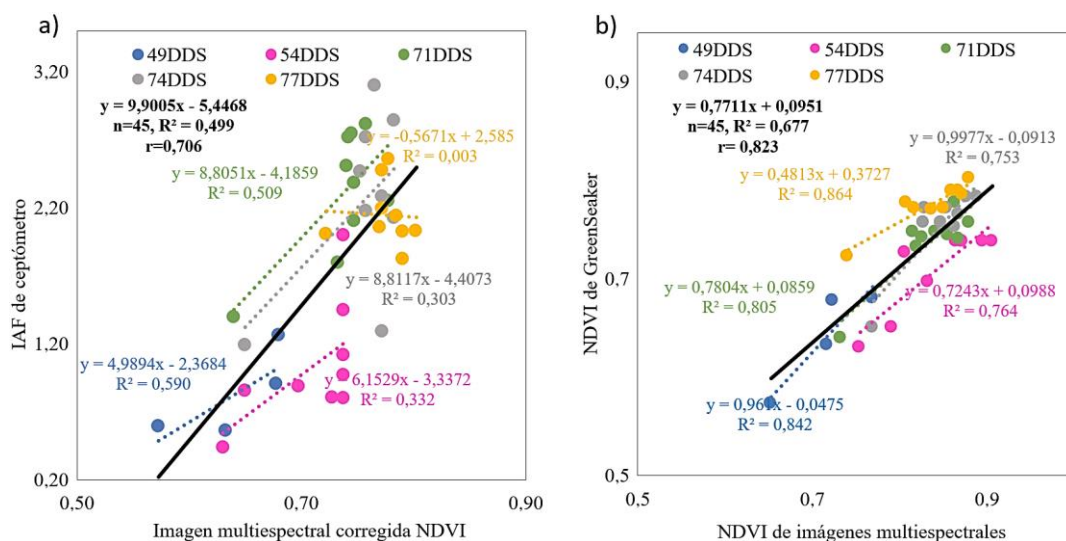


Figura 5. Relación entre NDVI estimados de imágenes multiespectrales y medido con GreenSeeker en campo (a), relación entre NDVI corregido y LAI con ceptómetro ambas medidas en campo (b).

Se calculó el NDVI empleando las bandas espectrales RED y NIR y se comparó con el NDVI medido en campo con el GreenSeeker™, obteniéndose una ecuación lineal que permitió estimar los valores de NDVI calculados. La fórmula empírica para hallar el NDVI se presenta a continuación en la **ecuación (6)**:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (6)$$

El IAF, que representa la cantidad de radiación que las plantas utilizan en la fotosíntesis, se obtuvo de la relación entre el IAF medido en campo por el ceptómetro y NDVI corregido con datos recolectados en campo, acorde a lo realizado por **Fan et al. (2009)**.

2.3.4. Modelo de balance de energía

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. La ET se calcula como un residuo de la ecuación de balance de energía superficial mediante el flujo de calor latente (*LE*). La fórmula empleada para el cálculo de *LE* es presentada en la **ecuación (7)**.

$$LE = R_n - G - H \quad (7)$$

Donde, R_n es la radiación neta ($W \cdot m^{-2}$); G es el flujo de calor del suelo ($W \cdot m^{-2}$); y H es el flujo de calor sensible ($W \cdot m^{-2}$) (**Allen et al., 2011**).

El cálculo de R_n requiere de manera previa la obtención de imágenes de NDVI, e imágenes IAF, ajustadas a datos de campo; además el MDT calculado se aplica en la radiación de onda corta incidente y radiación de onda larga incidente, la T_s y el IAF en el cálculo de la radiación de onda larga saliente; esta secuencia es detallada por **Bastiaanssen et al. (1998)**.

El G representa el calor conducido al suelo, su cálculo depende del valor del IAF obtenido, de la T_s obtenidos de las imágenes capturadas por el VANT y la R_n , y se calcula mediante las siguientes ecuaciones (8a y 8b). (**Allen et al., 2011**).

$$\frac{G}{R_n} = 0,05 + 0,18e^{-0,521 \times IAF} \quad (IAF \geq 0,5) \quad (8a)$$

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

Donde T_s es la temperatura de la superficie (K) y IAF es adimensional (**Allen et al., 2011**).

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 del aire, extrayendo datos de la estación meteorológica se calcula la densidad del aire (ρ_{air} , $kg \cdot m^{-3}$), C_p es el calor específico del aire a presión constante ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), el

dT (K) es la diferencia de la temperatura entre las alturas que definen la capa de intercambio calórico entre el aire y la superficie y r_{ah} es la resistencia aerodinámica ($s \cdot m^{-1}$) correspondiente a dT (**Allen et al., 2011; Tasumi, 2019**). El flujo de calor sensible (H) es la transferencia de calor y vapor que se da entre la cobertura vegetal y la atmósfera ocurre entre $Z1$ (superficie evaporante) y $Z2$ (nivel de referencia) (**Allen et al., 2011**).

Se calcula el gradiente de temperatura (dT) para cada pixel basado en la relación lineal entre el dT y la temperatura de la superficie (T_s) para los píxeles de anclaje frío y caliente (**Allen et al., 2011**), aplicando cada resultado a la **ecuación (9)** (**Acharya & Sharma, 2021**).

$$H = \rho_{air} \times C_p \times \frac{dT}{r_{ah}} \quad (9)$$

En la selección del píxel frío y caliente se definieron condiciones límites para el equilibrio energético. Los píxeles están en función de la homogeneidad entre sus píxeles vecinos y la distancia a la estación meteorológica. El píxel frío se identificó en campo agrícola, con selección de un subconjunto de píxeles con valores de temperatura en el rango $\pm 0,2$ K del promedio del 20% más frío, extraído del área del 5% de los valores más altos del NDVI. Finalmente, se seleccionó el 2% del 5% de los valores más altos del NDVI, siendo el píxel candidato final el promedio de este 2%. Por lo contrario, el píxel caliente se identificó en suelos desnudos sin vegetación, con selección de subconjunto de píxeles con valores de temperatura en el rango del $\pm 0,2$ K del promedio del 20% más caliente, extraído del área del 10% de los valores más bajos de NDVI. La selección de los píxeles finales se da en función de la proximidad del valor promedio y la homogeneidad entre sus píxeles vecinos (**Morton et al., 2013; Bhattarai et al., 2017**).

3. Resultados y discusión

3.1 Rendimiento y consumo de agua

Se identificaron las fases fenológicas del cultivo, a 66, 98 y 130 DDS para vegetativa, reproductiva y de maduración, destacando los estadios de macollamiento, estado de huso y floración, a 66, 76 y 89 DDS respectivamente (**Porras et al. 2020**).

En la **Tabla 3**, se presenta el consumo de agua y número de riegos aplicados por fase del cultivo de acuerdo a la condición de riego (IC y AWD) en sus pozas correspondientes, observando un ahorro de agua del 41,90% con AWD respecto a IC; y una reducción del 13,66% del rendimiento, pero un incremento de la EUA en 48,94%. Al respecto, los cortes de agua en la etapa reproductiva (floración) con

AWD han impactado negativamente en el rendimiento, ya que debieron estar entre macollamiento y estado de huso (Ishfaq et al., 2020). La implementación de AWD en la etapa reproductiva causó una reducción del rendimiento en comparación con la implementación de AWD en la fase vegetativa. Además, la textura franco-arenosa pudo influir en un mayor estrés hídrico, por el poco almacenamiento del agua; por lo tanto, se debe explorar la gestión óptima del AWD sin penalizar el rendimiento en condiciones del suelo actual.

3.2 Selección de píxel frío y caliente

La selección de los píxeles extremos caliente y frío para las fechas de campo (Tabla 4, muestra que los píxeles fríos corresponden a una temperatura superficial de (T_s) mínima de 283,22 K, y valores máximos de NDVI, IAF y albedo de 0,83, 3,03 y 0,33, respectivamente. Los píxeles calientes corresponden a una temperatura superficial (T_s) máxima de 331,23 K, valores mínimos de NDVI, IAF y albedo de 0,06, 0,005 y 0,21, respectivamente. Las características anteriormente señaladas corroboran lo expuesto por Allen et al. (2011) y Morton et al. (2013), quienes afirman que el proceso de verificación de los píxeles frío y caliente se realizan en áreas separadas, es decir que el píxel frío se debe seleccionar en coberturas vegetales, mientras que el píxel caliente se debe seleccionar en suelos desnudos sin vegetación.

3.3 Balance de energía

En la Figura 6 se presenta la variación espacial de los componentes de balance de energía R_n , G , H y LE en macollamiento (23 y 28 de octubre), en primordio floral (14 y 17 de noviembre) y estado de huso (20 de noviembre) del cultivo de arroz. En la Tabla 4 se muestra los resultados del NDVI, IAF y componentes del balance de energía por sistema de riego. Para el riego con IC los valores varían en el rango de 540,63 a 621,09 $W \cdot m^{-2}$, de 47,99 a 56,69 $W \cdot m^{-2}$, y 159,68 a 206,31 $W \cdot m^{-2}$ para R_n , G y H , respectivamente. Para AWD, los valores varían de 553,76 a 655,75 $W \cdot m^{-2}$, 52,70 a 58,11 $W \cdot m^{-2}$, y 139,36 a 206,39 $W \cdot m^{-2}$ para R_n , G y H , respectivamente. Para FL, los valores varían entre 527,88 a 591,21 $W \cdot m^{-2}$, 46,71 a 52,51 $W \cdot m^{-2}$, y 160,00 a 208,76 $W \cdot m^{-2}$ para R_n , G y H , respectivamente.

Según Allen et al. (2011) y Nassar et al. (2021), la R_n puede encontrarse entre 100 a 800 $W \cdot m^{-2}$ dependiendo de la variación diurna, alcanzando un mayor valor al medio día. Otros autores indican que G varía de 0 a 180 $W \cdot m^{-2}$ (Nassar et al., 2021), y H varía de 50 a 400 $W \cdot m^{-2}$ (Acharya & Sharma, 2021). Los resultados obtenidos en este estudio están dentro de estos rangos. Sin embargo, Nassar et al. (2021) indican que los componentes del balance de energía alcanzan valores más altos al medio día, con variación horaria según estación del año (verano, primavera, otoño e invierno) y valores más altos en verano.

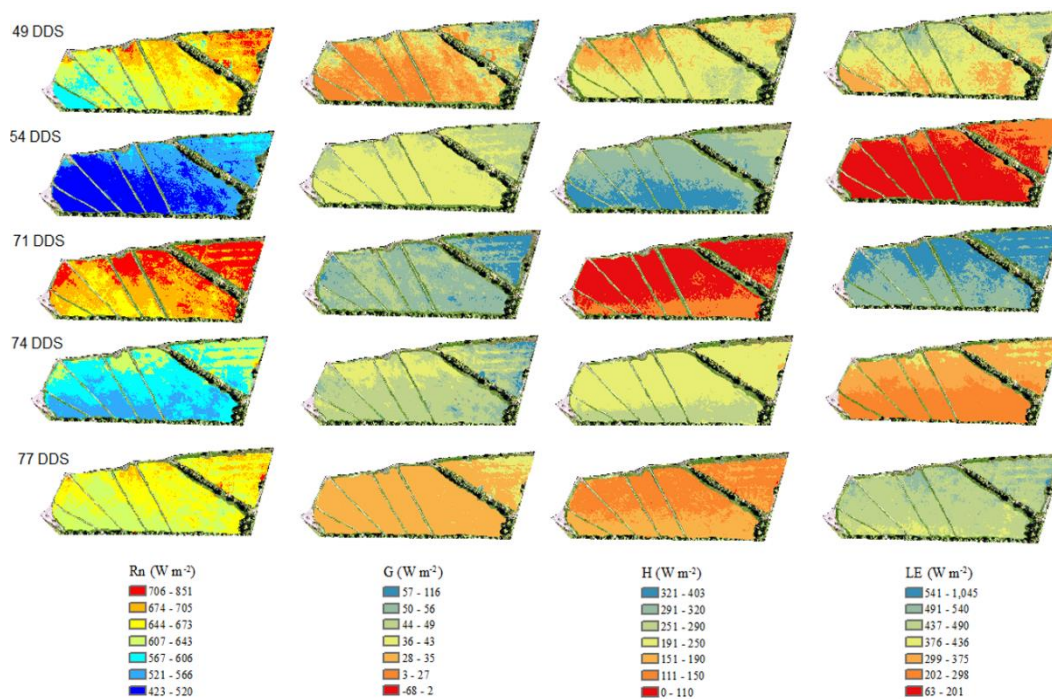


Figura 6. Variación espacial de Radiación Neta (R_n), Flujo de calor del suelo (G), flujo de calor del sensible (H) y flujo de calor latente (LE) en macollamiento (49 DDS, 54 DDS), en primordio floral (71 DDS, 74 DDS) y estado de huso (77 DDS) del cultivo de arroz.

Tabla 3
Consumo de agua por fase vegetativa, y número de riegos

Descripción	Almácigo		Fase vegetativa		Fase reproductiva		Fase de maduración		Consumo total (m³ ha⁻¹)	Producción	EUA
	Consumo (m³ ha⁻¹)	Número de riegos	Consumo (m³ ha⁻¹)	Número de riegos	Consumo (m³ ha⁻¹)	Número de riegos	Consumo (m³ ha⁻¹)	Número de riegos			
IC											
Poza-2	2500	3	4283,75	7	9995,41	4	5711,66	22490,83	11,32	0,50	
Poza-3	2500	3	4196,49	7	9791,82	4	5595,33	22083,64	9,76	0,44	
AWD											
Poza-1	2500	1	1694,46	4	4377,82	4	4377,82	12950,10	9,10	0,70	
FL											
Poza-4	2500	-	-	-	-	-	-	-	9,99	-	
Poza-5	2500	-	-	-	-	-	-	-	9,87	-	
Poza-6	2500	-	-	-	-	-	-	-	11,06	-	

Tabla 4
Selección del píxel frío y caliente con valores de NDVI, albedo, temperatura y las constantes de calibración [$dT = a + b \cdot T_s$; (Allen et al., 2011)]

Fecha	DDS	Píxel	Coordenadas (WGS84, UTM)		NDVI	IAF	Albedo	T(K)	a	b
			X	Y						
23-Oct	49	Frío	677128,82	9268885,52	0,91	1,97	0,23	290,87	0,297	-85,473
		Caliente	677236,62	9268711,78	0,37	0,02	0,13	300,11		
28-Oct	54	Frío	677131,92	9268668,88	0,76	1,42	0,25	289,21	0,216	-60,674
		Caliente	677143,54	9268827,36	0,35	0,07	0,16	297,26		
14-Nov	71	Frío	677144,44	9268877,83	0,79	3,17	0,20	292,51	0,038	-10,915
		Caliente	677233,76	9268719,21	0,23	0,01	0,18	328,25		
17-Nov	74	Frío	677121,00	9268890,21	0,81	3,66	0,20	293,36	0,068	-18,245
		Caliente	677238,46	9268710,73	0,28	0,03	0,16	327,15		
20-Nov	77	Frío	677178,82	9268779,75	0,81	2,65	0,25	301,83	0,093	-26,620
		Caliente	677237,62	9268703,73	0,52	0,11	0,22	331,26		

Tabla 5

Resumen de los valores del índice de vegetación bajo riego de inundación continua (IC), alternancia de humedecimiento y secado (AWD), y filtración lateral (FL)

Detalle	Fase vegetativa Macollamiento			Fase reproductiva Primordio floral			Estado de huso 77 DDS
	49 DDS	54 DDS	$\bar{X} \pm S$	71 DDS	74 DDS	$\bar{X} \pm S$	
	Inundación continua (IC)						
Albedo	0,19 ± 0,02	0,18 ± 0,02	0,19 ± 0,02	0,18 ± 0,01	0,19 ± 0,01	0,19 ± 0,01	0,18 ± 0,01
Térmica	19,19 ± 0,57	21,07 ± 0,33	20,13 ± 0,45	21,48 ± 0,69	22,18 ± 1,36	21,83 ± 1,03	27,01 ± 0,44
NDVI	0,77 ± 0,04	0,72 ± 0,02	0,75 ± 0,03	0,83 ± 0,02	0,80 ± 0,02	0,82 ± 0,02	0,79 ± 0,01
IAF	1,64 ± 0,34	1,04 ± 0,13	1,34 ± 0,24	2,15 ± 0,30	2,24 ± 0,44	2,15 ± 0,37	1,92 ± 0,14
Rn	670,06 ± 18,93	491,01 ± 13,07	580,535 ± 16,00	717,80 ± 13,54	612,13 ± 15,03	664,97 ± 14,29	619,83 ± 7,66
G	55,57 ± 4,97	25,09 ± 1,53	40,33 ± 3,25	39,41 ± 3,09	61,16 ± 3,39	50,29 ± 3,24	39,46 ± 1,25
H	220,56 ± 24,17	307,37 ± 7,16	263,97 ± 15,67	102,43 ± 6,30	217,41 ± 11,21	159,92 ± 8,76	142,95 ± 4,28
LE	393,93 ± 31,73	158,53 ± 17,39	212,83 ± 24,56	575,95 ± 16,53	333,54 ± 24,40	454,75 ± 20,47	480,60 ± 19,31
ET24	5,86 ± 0,47	5,68 ± 0,62	5,77 ± 1,09	8,13 ± 0,23	6,02 ± 0,43	7,08 ± 0,33	9,64 ± 0,39
Alternancia de humedecimiento y secado (AWD)							
Albedo	0,21 ± 0,02	0,21 ± 0,02	0,21 ± 0,02	0,20 ± 0,01	0,20 ± 0,01	0,20 ± 0,01	0,18 ± 0,01
Térmica	18,68 ± 0,58	21,42 ± 0,28	20,05 ± 0,43	21,31 ± 0,69	23,54 ± 1,83	22,43 ± 2,52	26,75 ± 0,54
NDVI	0,76 ± 0,05	0,73 ± 0,03	0,75 ± 0,04	0,86 ± 0,01	0,83 ± 0,02	0,85 ± 0,02	0,80 ± 0,01
IAF	1,60 ± 0,40	1,13 ± 0,18	1,37 ± 0,29	2,57 ± 0,32	2,97 ± 0,44	2,77 ± 0,38	2,09 ± 0,14
Rn	656,49 ± 18,08	461,92 ± 15,54	559,21 ± 33,62	697,40 ± 14,96	585,58 ± 18,20	641,49 ± 16,58	618,91 ± 7,51
G	55,91 ± 6,00	24,60 ± 2,08	40,26 ± 4,04	36,96 ± 2,16	59,34 ± 2,66	48,15 ± 2,41	38,18 ± 0,90
H	197,31 ± 28,16	317,29 ± 9,02	257,30 ± 18,59	102,85 ± 7,55	237,13 ± 16,11	169,99 ± 11,83	141,58 ± 6,17
LE	403,28 ± 37,27	120,07 ± 21,46	261,68 ± 29,37	558,58 ± 19,46	289,14 ± 33,64	423,86 ± 26,55	464,07 ± 22,13
ET24	5,99 ± 0,55	4,30 ± 0,77	5,15 ± 0,66	7,88 ± 0,27	5,22 ± 0,60	6,55 ± 0,44	9,31 ± 0,44
Filtración Lateral (FL)							
Albedo	0,18 ± 0,02	0,18 ± 0,01	0,18 ± 0,02	0,19 ± 0,01	0,19 ± 0,01	0,19 ± 0,01	0,17 ± 0,01
Térmica	19,22 ± 0,55	21,53 ± 0,30	20,38 ± 0,43	21,72 ± 0,88	24,16 ± 2,10	22,94 ± 2,98	26,91 ± 0,60
NDVI	0,77 ± 0,01	0,73 ± 0,01	0,75 ± 0,01	0,86 ± 0,01	0,83 ± 0,01	0,85 ± 0,01	0,80 ± 0,00
IAF	1,64 ± 0,16	1,14 ± 0,08	1,39 ± 0,12	2,58 ± 0,22	2,91 ± 0,31	2,75 ± 0,27	2,08 ± 0,10
Rn	678,81 ± 11,03	484,37 ± 11,22	581,59 ± 11,13	711,06 ± 14,31	593,62 ± 18,57	652,34 ± 16,44	622,74 ± 6,59
G	55,54 ± 2,24	24,68 ± 0,79	40,11 ± 3,03	36,66 ± 2,07	60,13 ± 2,99	48,40 ± 2,53	38,52 ± 1,11
H	222,43 ± 23,71	320,60 ± 7,46	271,52 ± 15,59	106,92 ± 8,93	239,16 ± 16,78	173,04 ± 12,86	143,12 ± 6,34
LE	400,84 ± 28,80	139,09 ± 16,42	214,82 ± 22,61	567,48 ± 21,32	294,33 ± 36,37	430,91 ± 28,85	482,93 ± 15,43
ET24	5,96 ± 0,43	4,99 ± 0,59	5,48 ± 0,51	8,01 ± 0,30	5,32 ± 0,65	6,67 ± 0,48	9,69 ± 0,31

La variación espacial del H (Figura 6) está directamente influenciada por la temperatura superficial. La variación térmica del día 54 DDS, ocurre por el apagado y encendido del VANT para realizar el cambio de batería. La cámara H20T es una cámara no refrigerada, por lo que el propio calor interno del sensor influye en la captura de datos de temperatura. Esto podría generar una variación en las lecturas, por lo que se sugiere no apagar el equipo para cambio de batería.

3.4 Evapotranspiración del cultivo diario (ETc)

En la Figura 7 se aprecia la variación espacial de la ETc diaria, con valores (x, S) para las fases de macollamiento, primordio floral y estado de huso, según condición de riego.

En la Tabla 5 se presentan los valores de la ETc, según estadio y sistema de riego, obteniéndose

valores (X±S) de 7,28, 8,21 y 6,29 mm·d⁻¹ (macollamiento), 5,62, 6,36 y 5,33 mm·d⁻¹ (primordio floral) y 5,68, 5,85 y 5,41 mm·d⁻¹ (estado de huso), con valores máximos de 13,72, 7,60 y 7,35 mm·d⁻¹ para IC, y 13,17, 7,59 y 7,35 mm·d⁻¹ para AWD.

En la Tabla 6 se muestra los promedios y desviación estándar de los componentes de balance de energía, bajo diferentes sistemas de riego. Se observa que en un riego AWD hay una reducción de 6,56% y 32,43% para NDVI e IAF, 21,28% para albedo y 11,58%, 8,09% y 2,45% para Rn, G y H, respectivamente, respecto a FL. Se obtienen valores promedios de ETc de 7,07, 6,79 y cd 6,54 mm·d⁻¹ para IC, FL y AWD, respectivamente. Además, se obtiene con el riego AWD un ahorro en el consumo de agua de 42% (ΔCA), pero una reducción del rendimiento del 14% (ΔY); esto se traduce en un incremento del 49% (ΔEUA) en la eficiencia del uso de agua.

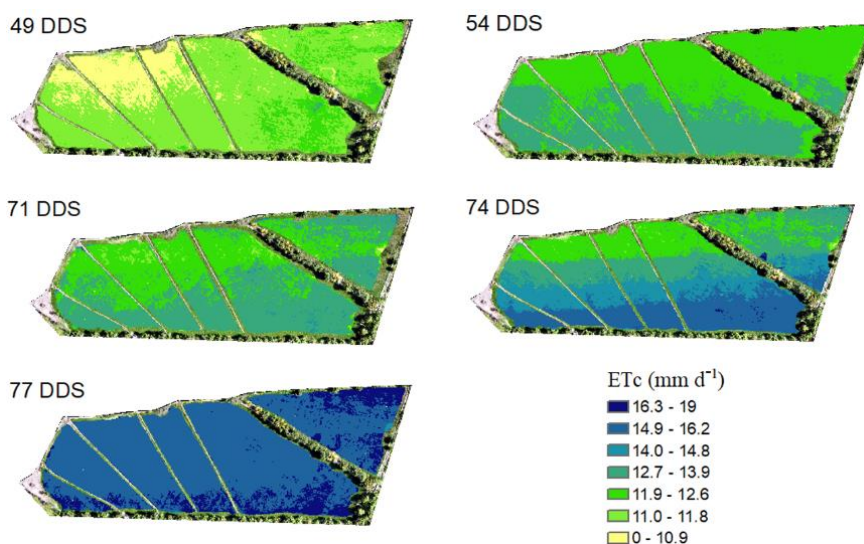


Figura 7. Variación espacial de la evapotranspiración (ET) en macollamiento (49 DDS, 54 DDS), primordio floral (71 DDS, 74 DDS) y estado de huso (77 DDS) del cultivo de arroz.

Tabla 6

Resultados finales de los componentes de balance de energía, Evapotranspiración del cultivo (ETc) y otros resultados, según el riego

Detalle	Inundación continua (IC)	Filtración Lateral (FL)	Alternancia de humedecimiento y secado (AWD)
Albedo	0,18 ± 0,01	0,18 ± 0,01	0,20 ± 0,01
Térmica (°C)	22,19 ± 0,68	22,71 ± 0,89	22,34 ± 0,78
NDVI	0,78 ± 0,02	0,80 ± 0,01	0,80 ± 0,02
IAF (m ² ·m ⁻²)	1,8 ± 0,27	2,07 ± 0,17	2,07 ± 0,30
Rn (W·m ⁻²)	622,17 ± 13,65	618,12 ± 12,34	604,06 ± 14,86
G (W·m ⁻²)	44,14 ± 2,85	43,11 ± 1,84	43,00 ± 2,76
H (W·m ⁻²)	198,14 ± 10,62	206,45 ± 12,64	199,23 ± 13,40
LE (W·m ⁻²)	402,25 ± 21,87	376,93 ± 23,67	367,03 ± 26,79
ETc (mm·d ⁻¹)	7,07 ± 0,43	6,79 ± 0,46	6,54 ± 0,53
Rendimiento (t·ha ⁻¹)	10,54 ± 1,24	10,31 ± 0,35	9,10 ± 0,98
Consumo de agua (m ³)	22287,23	-	12950,1
Eficiencia en el consumo de agua (EUA) (kg·m ⁻³)	0,47	-	0,7
Variación del consumo del agua (ΔW)			-41,90%
Variación del rendimiento (ΔY)			-13,66%
Variación de la eficiencia en el consumo del agua (ΔEUA)			-48,94%

Los valores de IAF en los arrozales con AWD, son los menores en comparación a los otros métodos de riego, esto por el estrés hídrico ocasionado por riego de alternancia, humedecimiento y secado en la etapa de macollamiento. La Rn están dentro del rango obtenido por **Lee & Kim, (2016)**, quien monitoreo cultivo de arroz con información de imágenes del satélite MODIS, obteniendo valores de Rn de 400 a 800 W·m⁻²; con valores de G, de 28 a 78 W·m⁻² y H hasta 241 W·m⁻²; siendo valores cercanos a los obtenidos por **Lee & Kim (2016)**.

Los valores de NDVI registrados están en aumento, según aumente los días del cultivo, esto como respuesta al desarrollo del cultivo y fertilización. Sin embargo, los valores promedios son menores a 0,8 lo que podría deberse a una dosis menor de fertilización por los altos costos en el mercado, además puede haberse afectado por una geminación no uniforme y leve disminución de la densidad poblacional (**Gonzalez & Mayorga, 2018**). Sin embargo, estos valores son mayores a los obtenidos por **García & Martínez, (2009)** que registraron valores de 0,36 a 0,71 en arrozales en Colombia, tomadas con un VANT.

En la **Tabla 7**, se presentan valores de ETc estimados para diferentes condiciones climáticas, sistema

de riego y método de ETc; con valores máximos de ETc se encuentran en el clima tropical, templado mediterráneo y árido (Senegal, Estados Unidos y Irán) con 10,50, 8,40 y 8,40 mm·d⁻¹. En otros estudios presenta valores superiores a lo estimado en la zona de estudio, además presentan mayor afinidad en las condiciones climáticas. Sin embargo, en las condiciones climáticas de templado (**Lee & Kim, 2016**), húmedo tropical (**Sawadogo et al., 2020**), monzónico tropical (**Saha et al., 2022**) y monzónico subtropical (**Liu et al., 2018**) y continental cálido (**Wei et al., 2023**), presentan valores inferiores de 5,30, 6,17, 5,64, 4,03 y 5,10 mm·d⁻¹. Aunque, en el clima subtropical húmedo de China (**Wei et al., 2023**), se asemeja al resultado obtenido de 7,07 mm d⁻¹. Además, de las similitudes en algunas condiciones climáticas, también presenta diferentes ETc debido a las variedades de arroz, morfología de suelo y a las condiciones antrópicas.

La fase de cultivo que registro mayor promedio de ETc fue en la fase de macollamiento, por presentar riego unos días antes del vuelo del VANT, como fue el 28 de octubre (54 DDS), presentando esta fecha el mayor ETc, además ese día, se registró la temperatura máxima de los días de vuelo, condición que favoreció un incremento de la ETc.

Tabla 7

Valores de evapotranspiración del cultivo (ETc) de diversos estudios

Condición climática	Sistema de riego	Método para estimar ETc	ETc (mm d ⁻¹)	Zona de estudio	Referencia
Árido templado	Inundado AWD*	Balance de energía (METRIC)	7,07 6,54	Perú	Área de estudio
Árido cálido	Goteo	Balance hídrico (lisímetro)	1,75-5,16	Perú	Neira et al. (2020)
Árido cálido	Goteo	Balance de energía (METRIC)	1,65-7,48	Perú	Quille et al. (2021)
Árido	Inundado	<i>ETo x Kc</i>	3,40-8,40	Irán	Taherparvar & Pirmoradian (2018)
Templado	Inundado	Balance de energía: SEBAL y Eddy Covariance	5,30 y 5,20	Corea del Sur	Lee & Kim (2016)
Tropical	Inundado	Balance hídrico	4,40-10,50	Senegal	Djaman et al. (2019)
Húmedo tropical	Inundado	Balance de energía (SEBAL)	5,52-6,17	Burkina Faso	Sawadogo et al. (2020)
Monzónico tropical	Inundado	Balance de energía (METRIC)	3,41-5,64	Bangladesh, Mymensingh	Saha et al. (2022)
Monzónico subtropical	Inundado	Balance de energía (Torre de flujo)	4,03	China	Liu et al. (2018)
Monzónico subtropical	Inundado	Balance de energía (SEBAL)	1,05-7,43	China	Wei et al. (2022)
Subtropical húmedo			2,5-5,6 y 3,5-7,2	China, Nanchang	
Templado mediterráneo	Inundado	Balance de energía: SEBAL y Torre de flujo	1,0-7,6 y 0,5-8,4	Estados Unidos	Wei et al. (2023)
Continental cálido			0,2-4,1 y 0,5-5,1	Corea del Sur	

* Alternancia de humedecimiento y secado (AWD).

Además, es posible que la temperatura superficial captada por la cámara térmica esté alterada por el cambio de batería realizada durante el monitoreo del VANT.

La ETc en el arrozal, fue menor en las fases de primordio floral y estado de huso, debido a un desperfecto con la bomba de riego, por lo cual se tuvo cinco días sin riego. La reducción del rendimiento

puede ser causada por la reducción de la dosis de fertilización empleada y control parcial del ataque de plagas (*Pyricularia oryzae* y *Tagosodes orizicolus*), debido al alto costo en el mercado.

4. Conclusiones

Este estudio evalúa los mosaicos multispectrales y térmicos de alta resolución espacial mediante la calibración de los parámetros del modelo de balance de energía para la estimación del modelo METRIC en arrozales. El ajuste de las imágenes térmicas es importante para la implementación del modelo METRIC, por lo tanto, el uso de un radiómetro con lecturas en diferentes coberturas obtuvo un RMSE de 12,5 °C, mostrando resultados confiables para la estimación de los componentes del modelo METRIC.

La calibración de los índices de vegetación NDVI e IAF con mediciones de campo, resultaron en un RMSE de 0,099 y 1,219, respectivamente. Los componentes de balance de energía R_n , G , H y LE , mostraron valores aceptables dentro de los rangos establecidos, para el área de estudio en las diferentes fases de desarrollo del cultivo.

Se obtienen valores medios de 6,34 y 5,84 mm·d⁻¹ para riego con inundación continua y alternancia de humedecimiento y secado, respectivamente. Además, se obtiene un ahorro en el consumo de agua del 42%, pero una reducción del rendimiento del 14%, que se traduce en un incremento del 49% en la eficiencia del uso de agua, resultados iniciales que permitirán optimizar el uso del agua y mejorar la gestión del riego. Para futuras investigaciones se sugiere realizar un estudio con mayor margen de área, con diferentes variedades que sean resistente al estrés hídrico y la utilización en conjunta de imágenes satelitales de Sentinel y VANT, y obtener un plan de gestión hídrica para afrontar el cambio climático.


Financiamiento

Esta investigación fue financiada por la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECID), en el marco del proyecto "Mejora de la gestión del agua en arrozales de productores rurales peruanos empleando VANT y satélites en el marco del cambio climático" (Proyecto N° 2020/ACDE/000307 - RICEMON).

Conflictos de Interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

ORCID

L. Ramos-Fernández  <https://orcid.org/0000-0003-3946-7188>
 D. Quispe-Tito  <https://orcid.org/0000-0003-3325-5512>
 L. Altamirano-Gutiérrez  <https://orcid.org/0000-0002-7688-598X>
 C. Cruz-Grimaldo  <https://orcid.org/0000-0002-0337-3799>
 J. A. Quille-Mamani  <https://orcid.org/0000-0002-5283-7211>
 J. P. Carbonell-Rivera  <https://orcid.org/0000-0002-6724-6780>
 J. Torralba  <https://orcid.org/0000-0001-8644-8604>
 L. A. Ruiz  <https://orcid.org/0000-0003-0073-7259>

Referencias bibliográficas

- 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. *In Remote Sensing*, 13(9), 1822.
- 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., Menenti, M., Feddes, R., & Holtslag, A. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212–213, 198–212.
- Bhattacharai, 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.
- Cheng, H., Shu, K., Zhu, T., Wang, L., Liu, X., Cai, W., Qi, Z., & Feng, S. (2022). Effects of alternate wetting and drying irrigation on yield, water and nitrogen use, and greenhouse gas emissions in rice paddy fields. *Journal of Cleaner Production*, 349, 131487.
- Chu, G., Chen, T., Chen, S., Xu, C., Wang, D., & Zhang, X. (2018). The effect of alternate wetting and severe drying irrigation on grain yield and water use efficiency of Indica-japonica hybrid rice (*Oryza sativa* L.). *Food and Energy Security*, 7(2), e00133.
- Djaman, K., Rudnick, D. R., Moukoubi, Y. D., Sow, A., & Irmak, S. (2019). Actual evapotranspiration and crop coefficients of irrigated lowland rice (*Oryza sativa* L.) under semiarid climate. *Italian Journal of Agronomy*, 14(1), 19–25.
- De la Cruz, K. M. S., Ella, V. B., & Lampayan, R. M. (2022). A coupled surface-subsurface flow model for simulating soil-water dynamics in lowland rice field under alternate wetting and drying conditions. *Agricultural Water Management*, 265, 107541.
- FAOSTAT. 2023. *Datos sobre alimentación y agricultura. División de Estadística de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)*. www.fao.org/faostat/en/#data/QC.
- Fan, L., Gao, Y., Brück, H., & Bernhofer, Ch. (2009). Investigating the relationship between NDVI and IAF in semi-arid grassland in Inner Mongolia using in-situ measurements. *Theoretical and Applied Climatology*, 95(1-2), 151-156.
- Fornasiero, A., Wing, R. A., & Ronald, P. (2022). Rice domestication. *Current Biology*, 32(1), R20-R24
- Gao, S., Gu, Q., Gong, X., Li, Y., Yan, S., & Li, Y. (2023). Optimizing water-saving irrigation schemes for rice (*Oryza sativa* L.) using DSSAT-CERES-Rice model. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 16(2), 142-151.
- García, S., Martínez, L. (2009). Satellite image based method for rice (*Oryza sativa* L.) crop identification. *Agronomía Colombiana* 28(2), 281-290.
- Gonzalez, M., & Mayorga-Ruiz, Z. L. (2018). Normalized difference vegetation index for rice management in El Espinal, Colombia. *DYNA*, 85(205), 47-56.
- Hoffmann, H., Nieto, H., Jensen, R., Guzinski, R., Zarco-Tejada, P., & Friborg, T. (2016). Estimating Evaporation with Thermal UAV Data and Two-source Energy Balance Models. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 697–713.
- Hussain, Z., Wang, Z., Wang, J., Yang, H., Arfan, M., Hassan, D., Wang, W., Azam, M. I., & Faisal, M. (2022). A comparative Appraisal of Classical and Holistic Water Scarcity Indicators. *Water Resources Management*, 36(3), 931-950.

- Ishfaq, M., Farooq, M., Zulfiqar, U., Hussain, S., Akbar, Ahmad, N., Nawaz, A., & Ahmad Anjum, S. (2020). Alternate wetting and drying: A water-saving and ecofriendly rice production system. *Agricultural Water Management*, 241, 1-22.
- Jiang, Y., Carrijo, D., Huang, S., Chen, J., Balaine, N., Zhang, W., Groenigen, K., & Linquist, B. (2019). Water management to mitigate the global warming potential of rice systems: A global meta-analysis. *Field Crops Research*, 234, 47-54.
- Lee, Y., & Kim, S. (2016). The Modified SEBAL for Mapping Daily Spatial Evapotranspiration of South Korea Using Three Flux Towers and Terra MODIS Data. *Remote Sensing*, 8(12), 983.
- Liu, X., Xu, J., Yang, S., & Zhang, J. (2018). Rice evapotranspiration at the field and canopy scales under water-saving irrigation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 130(2), 227-240.
- Mendoza, C., Ramírez, C., Ojeda, W., Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Flores, H., & Colegio de Postgraduados. (2017). Estimation of leaf area index and yield of greenhouse-grown poblano pepper. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 9(1), 37-50.
- Mote, K., Rao, V. P., Ramulu, V., Kumar, K. A., & Devi, M. U. (2022). Performance of rice (*Oryza sativa* (L.)) under AWD irrigation practice—A brief review. *Paddy and Water Environment*, 20(1), 1-21.
- Morton, C. G., Huntington, J. L., Pohl, 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 suass and ec information in the grapex project. *Remote Sensing*, 13(15), 2887.
- Neira, E., Ramos-Fernández, L., & Ramón, L. (2020). Coefficient of cropping (Kc) of rice from drain lysimeter in The Molina, Lima-Perú. *IDESIA (Chile). Lima-Perú*, 38(1), 1-7
- Niu, H., Hollenbeck, D., Zhao, T., Wang, D., & Chen, Y. (2020). Evapotranspiration estimation with small uavs in precision agriculture. *Sensors*, 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)
- Ouda, S., & Zohry, A. E. H. (2022). Water-Smart Practices to Manage Water Scarcity. En S. Ouda & A. E.-H. Zohry, *Climate-Smart Agriculture* (pp. 3-26). Springer International Publishing.
- Pintér, K., & Nagy, Z. (2022). Building a UAV Based System to Acquire High Spatial Resolution Thermal Imagery for Energy Balance Modelling. *Sensors*, 22(9), 3251.
- Porras, R., Ramos, L., Ojeda, W., & Ontiveros, R. (2020). Performance assessment of the AquaCrop model to estimate rice yields under alternate wetting and drying irrigation in the coast of Peru. *Scientia Agropecuaria*, 11(3), 309 – 321.
- Quille, J., Ramos-Fernández, L., & Ontiveros, R. (2021). Estimación de la evapotranspiración del cultivo de arroz en Perú mediante el algoritmo METRIC e imágenes RPA. *Asociación Española de Teledetección*, 58, 23-38.
- Rahman, M. M., Hasan, S., Ahmed, Md. R., & Adham, A. K. M. (2022). Recycling deep percolated water in continuously flooding irrigated rice fields to mitigate water scarcity. *Paddy and Water Environment*, 20, 449-466.
- 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*, 7, 88-102.
- Río, O., Espinoza, T., Sáenz, A., & Córtes, F. (2019). Levantamientos Topográficos con Drones. *Revista Ciencia, Ingeniería y Desarrollo Tec Lerdo*, 7(5), 15-19.
- Roy, D., Hossain, Md. B., Pranto, M. R. B. H., & Islam, Md. T. (2022). Drought Management by Integrated Approaches in T. Aman Rice Season to Escalate Rice Productivity in Drought Prone Regions of Bangladesh. En G. M. Tarekul Islam, S. Shampa, & A. I. A. Chowdhury (Eds.), *Water Management: A View from Multidisciplinary Perspectives* (pp. 351-364). Springer International Publishing.
- Saha, S., Ahmmed R., & Jahan N. (2022). Actual Evapotranspiration Estimation Using Remote Sensing: Comparison of Sebal and Metric Models. In: Tarekul Islam GM, Shampa S., Chowdhury AIA (eds) *Water Management: A View from Multidisciplinary Perspectives*. Springer, Cham. 365 – 383.
- Sawadogo, A., Kouadio, L., Traoré, F., Zwart, S. J., Hessels, T., & Gündoğdu, K. S. (2020). Spatiotemporal Assessment of Irrigation Performance of the Kou Valley Irrigation Scheme in Burkina Faso Using Satellite Remote Sensing-Derived Indicators. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(8), 484.
- Sisheber, B., Marshall, M., Mengistu, D., & Nelson, A. (2022). Tracking crop phenology in a highly dynamic landscape with knowledge-based Landsat–MODIS data fusion. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 106, 102670.
- 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, 105805.
- Taheerparvar, M., & Pirmoradian, N. (2018). Estimation of Rice Evapotranspiration Using Reflective Images of Landsat Satellite in Sefidroud Irrigation and Drainage Network. *Rice Science*, 25(2), 111-116.
- 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, 105805.
- Torres-Rua, A. (2017). Vicarious Calibration of sUAS Microbolometer Temperature Imagery for Estimation of Radiometric Land Surface Temperature. *Sensors*, 17(7), 1499.
- Wei, G., Cao, J., Xie, H., Xie, H., Yang, Y., Wu, C., Cui, Y., & Luo, Y. (2022). Spatial-Temporal Variation in Paddy Evapotranspiration in Subtropical Climate Regions Based on the SEBAL Model: A Case Study of the Ganfu Plain Irrigation System, Southern China. *Remote Sensing*, 14(5), 1201.
- Wei, J., Cui, Y., & Luo, Y. (2023). Rice growth period detection and paddy field evapotranspiration estimation based on an improved SEBAL model: Considering the applicable conditions of the advection equation. *Agricultural Water Management*, 278, 108141.
- Yu, Q., Cui, Y., Han, H., & Liao, B. (2023). Modelling water consumption and nitrogen loss in paddy fields with an improved ORYZA model. *Field Crops Research*, 292, 108828
- Zobeidi, T., Yaghoubi, J., & Yazdanpanah, M. (2022). Farmers' incremental adaptation to water scarcity: An application of the model of private proactive adaptation to climate change (MPPACC). *Agricultural Water Management*, 264, 10752.