

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**“EVAPOTRANSPIRACIÓN ESTIMADA POR BALANCE DE ENERGÍA  
USANDO INFORMACIÓN REMOTA Y RIEGO CON ALTERNANCIA  
DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO EN ARROZALES, CHICLAYO”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERA AGRÍCOLA**

**ROXANA SARA PEÑA AMARO**

**LIMA – PERÚ**

**2024**

# TESIS 2024\_ ROXANA PEÑA

## INFORME DE ORIGINALIDAD

13%

INDICE DE SIMILITUD

13%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

|   |   |     |
|---|---|-----|
| 1 | <a href="https://repositorio.unprg.edu.pe">repositorio.unprg.edu.pe</a><br>Fuente de Internet       | 2%  |
| 2 | <a href="https://repositorio.inia.gob.pe">repositorio.inia.gob.pe</a><br>Fuente de Internet         | 2%  |
| 3 | <a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a><br>Fuente de Internet                           | 1%  |
| 4 | <a href="https://repositorio.lamolina.edu.pe">repositorio.lamolina.edu.pe</a><br>Fuente de Internet | 1%  |
| 5 | <a href="https://repositorio.unap.edu.pe">repositorio.unap.edu.pe</a><br>Fuente de Internet         | 1%  |
| 6 | <a href="https://orcid.org">orcid.org</a><br>Fuente de Internet                                     | <1% |
| 7 | <a href="https://www.scielo.cl">www.scielo.cl</a><br>Fuente de Internet                             | <1% |
| 8 | <a href="https://www.ittorreon.edu.mx">www.ittorreon.edu.mx</a><br>Fuente de Internet               | <1% |
| 9 | <a href="https://idoc.pub">idoc.pub</a><br>Fuente de Internet                                       | <1% |

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**“EVAPOTRANSPIRACIÓN ESTIMADA POR BALANCE DE  
ENERGÍA USANDO INFORMACIÓN REMOTA Y RIEGO CON  
ALTERNANCIA DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO EN  
ARROZALES, CHICLAYO”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

**INGENIERA AGRÍCOLA**

Presentado por:

**BACH. ROXANA SARA PEÑA AMARO**

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Ph.D. DAVID RICARDO ASCENCIOS TEMPLO  
Presidente

Dra. LIA RAMOS FERNÁNDEZ  
Asesor

Dr. NÉSTOR MONTALVO ARQUÍÑIGO  
Miembro

Dr. RAÚL ARNALDO ESPINOZA VILLAR  
Miembro

LIMA – PERÚ

2024

## **DEDICATORIA**

“Dedicado a mis señores padres, Freddy Peña y Rosalía Amaro por el apoyo y confianza durante toda mi etapa de estudiante y hasta el momento de hoy, a mí hermana Samy, quien siempre estuvo apoyándome a pesar de la distancia.”



## **AGRADECIMIENTO**

Al Proyecto “Implementación de herramientas tecnológicas en el desarrollo de un sistema de precisión con sensores remotos para optimizar el uso del agua y reducir la emisión de gases de efecto invernadero en arrozales en beneficio de los agricultores de la región Lambayeque”, de código: PE501078113-2022- PROCENCIA y cuyo socio es el CDECACC - Centro de desarrollo de competencias para la adaptabilidad al cambio climático. Se tiene como colaboradores al INIA - Vista Florida de Chiclayo y al AGPRES que forma parte también al INIA.

A mi asesora Dra. Lia Ramos Fernández, por el asesoramiento durante el desarrollo de la tesis, y al grupo de investigación DANI “Teledetección y cambio climático aplicado a los recursos hídricos y la agricultura” por el apoyo recibido en la realización de la investigación. A José Luis, David, Christian y todas las personas que me dieron su apoyo en este viaje de muchas experiencias, que las mantendré vivas en el recuerdo.

# ÍNDICE GENERAL

|   |      |
|---|------|
| RESUMEN .....   | viii |
| ABSTRACT .....  | ix   |
| I. INTRODUCCIÓN .....   | 1    |
| 1.1. Objetivo .....   | 3    |
| II. REVISIÓN DE LITERATURA.....   | 4    |
| 2.1. Evapotranspiración.....  | 4    |
| 2.1.1. Evaporación .....  | 4    |
| 2.1.2. Transpiración .....  | 5    |
| 2.1.3. Factores que influyen en la evapotranspiración.....  | 6    |
| 2.2. Métodos para determinar la evapotranspiración .....  | 7    |
| 2.2.1. Balance hídrico .....  | 7    |
| 2.2.2. Balance de energía.....  | 7    |
| 2.3. Análisis de varianza no paramétrico .....  | 15   |
| 2.3.1. Test de Kruskal-Wallis .....   | 15   |
| 2.3.2. Prueba de Dunn.....  | 15   |
| 2.4. Antecedentes .....   | 15   |
| III. METODOLOGÍA .....  | 18   |
| 3.1. Zona de estudio .....  | 18   |
| 3.1.1. Manejo de riego .....  | 19   |
| 3.1.2. Manejo del cultivo .....   | 20   |
| 3.1.3. Características del suelo .....  | 21   |
| 3.1.4. Colecta de imágenes multiespectrales y térmicas.....                                       | 22   |
| 3.2. Materiales y equipos.....  | 23   |
| 3.3. Procedimiento.....   | 24   |
| 3.3.1. Índice de área foliar (IAF) por método extractivo.....                                     | 24   |
| 3.3.2. Componentes del balance de energía para riego inundado (CF) y riego<br>AWD.....            | 26   |
| 3.3.3. Evapotranspiración del cultivo ( <i>ETc</i> ) para riego inundado (CF) y riego<br>AWD..... | 30   |
| IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....   | 35   |
| 4.1. Índice de área foliar (IAF) por método extractivo .....                                      | 35   |

|   |    |
|---|----|
| 4.2. Componentes del balance de energía para riego inundado (CF) y riego AWD ....           | 37 |
| 4.2.1. Radiación neta ( $R_n$ ) .....   | 38 |
| 4.2.2. Calor sensible del aire (H) .....  | 42 |
| 4.2.3. Flujo del calor del suelo (G) .....  | 46 |
| 4.2.4. Flujo de calor latente (LE) .....  | 48 |
| 4.3. Evapotranspiración del cultivo (ET <sub>c</sub> ).....                                 | 50 |
| 4.3.1. ET <sub>c</sub> por balance de energía .....   | 50 |
| 4.3.2. Comparación entre ET <sub>c</sub> por balance de energía y por balance hídrico ..... | 57 |
| 4.3.3. Eficiencia de uso de agua .....  | 58 |
| 4.3.4. ET <sub>c</sub> por balance energía y por balance hídrico en La Molina.....          | 60 |
| V. CONCLUSIONES .....   | 63 |
| VI. RECOMENDACIONES .....   | 64 |
| VII. BIBLIOGRAFÍA.....  | 65 |
| VIII. ANEXOS.....   | 73 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1: Valores de evapotranspiración (ET) de diferentes estudios presentados .....  | 17 |
| Tabla 2: Características de la zona de estudio .....  | 19 |
| Tabla 3: Descripción del manejo de riego por tratamiento .....  | 20 |
| Tabla 4: Características físicas del suelo .....  | 21 |
| Tabla 5: Características de las cámaras .....   | 22 |
| Tabla 6: Plan de vuelo .....  | 23 |
| Tabla 7: Materiales y equipos.....  | 23 |
| Tabla 8: Herramientas computacionales utilizadas en la investigación .....  | 23 |
| Tabla 9: Selección del píxel frío y caliente con los valores de NDVI, albedo,<br>temperatura y las constantes de calibración $dT = a + b T_s$ .....       | 43 |
| Tabla 10: Relación entre $ET_C$ y $ET_O$ .....  | 53 |
| Tabla 11: Resumen de resultados de los componentes del balance energético, $ET_c$ y<br>otros resultados durante la fase vegetativa .....                  | 54 |
| Tabla 12: Resumen de resultados de los componentes del balance energético, $ET_c$ y<br>otros resultados durante la fase reproductiva y de maduración..... | 55 |
| Tabla 13: Componentes del balance hídrico para cada técnica de riego (CF y AWD).....  | 58 |
| Tabla 14: Eficiencia de uso de agua para cada técnica de riego (CF y AWD) .....   | 59 |
| Tabla 15: Beneficio neto para cada técnica de riego (CF y AWD).....   | 59 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Proceso de evaporación del cultivo.....  | 5  |
| Figura 2: Proceso de transpiración del cultivo .....   | 6  |
| Figura 3: Ubicación de las parcelas a nivel nacional.....  | 18 |
| Figura 4: (a) Momentos que se realizaron los vuelos con el UAV según DDS; (b) Fase fenológica del arroz de acuerdo a los días después de la siembra (DDS) .....          | 21 |
| Figura 5: Muestras de hojas de arroz extraídas para estimación del IAF en campo INIA – Vista Florida .....   | 25 |
| Figura 6: Toma de temperatura en cada cobertura .....  | 26 |
| Figura 7: Resumen gráfico con las técnicas de riego empleadas .....  | 28 |
| Figura 8: Secuencia del diagrama de flujo para estimar de la ETc por METRIC .....  | 32 |
| Figura 9: Relación entre NDVI medido con GreenSeeker e IAF estimado por método extractivo de cinco fechas, realizados en campo .....                                     | 35 |
| Figura 10: Variación espacial del IAF en fase vegetativa (38 a 92 DDS), fase reproductiva (103 a 127 DDS) y fase de maduración (147 y 149 DDS) del cultivo de arroz..... | 36 |
| Figura 11: Condiciones meteorológicas según N° de vuelo realizado con el UAV de acuerdo al DDS.....  | 38 |
| Figura 12: Correlación entre las temperaturas captadas por el radiómetro Apogee MI-210 y la cámara térmica H20T .....  | 39 |
| Figura 13: Diagrama de cajas de Rn para los tratamientos CF y AWD, durante los días de vuelo del UAV .....   | 40 |
| Figura 14: Variación espacial de Rn en fase vegetativa (38 a 92 DDS), fase reproductiva (103 a 127 DDS) y fase de maduración (147 y 149 DDS) del cultivo de arroz.....   | 41 |
| Figura 15: Diagrama de cajas del H para los tratamientos CF y AWD, durante los días de vuelo del UAV .....   | 44 |
| Figura 16: Variación espacial de H en fase vegetativa (38 a 92 DDS), fase reproductiva (103 a 127 DDS) y fase de maduración (147 y 149 DDS) del cultivo de arroz.....    | 45 |
| Figura 17: Diagrama de cajas de G para los tratamientos CF y AWD, durante los días de vuelo del UAV .....  | 46 |
| Figura 18: Variación espacial de G en fase vegetativa (38 a 92 DDS), fase reproductiva (103 a 127 DDS) y fase de maduración (147 y 149 DDS) del cultivo de arroz.....    | 47 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 19: Diagrama de cajas de LE para los tratamientos CF y AWD, durante los días de vuelos del UAV .....  | 48 |
| Figura 20: Variación espacial del calor latente (LE) en fase vegetativa (38 a 92 DDS), fase reproductiva (103 a 127 DDS) y fase de maduración (147 y 149 DDS) del cultivo de arroz ..... | 49 |
| Figura 21: Variación horaria de la evapotranspiración de referencia (ET <sub>O</sub> ) durante las 24 horas del día en las 13 fechas de vuelos del UAV .....                             | 50 |
| Figura 22: Diagrama de cajas del ET <sub>c</sub> para los tratamientos CF y AWD, durante los días de vuelos del UAV .....  | 51 |
| Figura 23: Variación espacial de la ET <sub>c</sub> en fase vegetativa (38 a 92 DDS), fase reproductiva (103 a 127 DDS) y fase de maduración (147 y 149 DDS) del cultivo de arroz .....  | 52 |
| Figura 24: Correlación no paramétrica de Kruskal-Wallis y prueba estadística de Dunn entre regímenes de riego basados en la ET <sub>c</sub> .....  | 56 |
| Figura 25: Relación de la evapotranspiración (ET <sub>c</sub> ) por balance de energía entre la técnica de inundación continua (CF) y la técnica de riego AWD (AWD5, AWD10 y AWD20)..... | 57 |
| Figura 26: Relación entre ET <sub>c</sub> por balance de energía (método METRIC) y balance hídrico (AquaCrop).....   | 57 |
| Figura 27: Variación espacial de la ET <sub>c</sub> , según fonología del cultivo .....  | 61 |
| Figura 28: Relación entre ET <sub>c</sub> por balance de energía (método METRIC) y balance hídrico (AquaCrop) para La Molina .....   | 62 |

## ÍNDICE DE ANEXOS

|  |    |
|--|----|
| Anexo 1: Panel fotográfico de la visita de campo a las parcelas experimentales instaladas en la EEA "Vista Florida" del INIA -Chiclayo.....                          | 74 |
| Anexo 2: Panel fotográfico de la visita de campo a las pozas experimentales instaladas en el AER de la UNALM - La Molina .....                                       | 75 |
| Anexo 3: Imágenes RGB procesadas en el software Pix4D.....   | 76 |
| Anexo 4: Data meteorológica de las 24 horas de cada día de vuelo realizado .....   | 77 |
| Anexo 5: Información de $\cos\theta$ , distancia relativa entre la tierra y el sol ( $D_r$ ), y temperatura del aire en cada instante de los vuelos del UAV .....    | 84 |
| Anexo 6: Evapotranspiración de referencia ( <b>ET<sub>0</sub></b> ) calculada de las 24 horas de los 13 días de vuelos en campo .....                                | 84 |
| Anexo 7: Imágenes térmicas corregidas en °C.....   | 88 |
| Anexo 8: Selección del píxel frío y caliente con valores de NDVI, albedo, temperatura y las constantes de calibración “a y b” de la Molina .....                     | 89 |
| Anexo 9: Resumen de resultados de los componentes del balance energético, $ET_c$ y otros resultados, según su la fenológica del cultivo para la Molina .....         | 89 |
| Anexo 10: Variación espacial de $R_n$ en fase vegetativa (76 a 94 DDS), reproductiva (101 a 136 DDS) y maduración (151 DDS) del cultivo de arroz para La Molina..... | 90 |
| Anexo 11: Variación espacial de $H$ en fase vegetativa (76 a 94 DDS), reproductiva (101 a 136 DDS) y maduración (151 DDS) del cultivo de arroz para La Molina .....  | 91 |
| Anexo 12: Variación espacial de $G$ en fase vegetativa (76 a 94 DDS), reproductiva (101 a 136 DDS) y maduración (151 DDS) del cultivo de arroz para La Molina .....  | 92 |
| Anexo 13: Variación espacial del $LE$ en fase vegetativa (76 a 94 DDS), reproductiva (101 a 136 DDS) y maduración (151 DDS) del cultivo de arroz para La Molina..... | 93 |

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

### Acrónimo

|                 |   |
|-----------------|---|
| AWD             | Alternate Wetting and Drying (Alternancia de humedecimiento y secado)       |
| CF              | Continuous Flooding (Inundación continua)                                   |
| DDS             | días después de la siembra  |
| EEA             | Estación Experimental Agraria   |
| ET <sub>C</sub> | Evapotranspiración del cultivo  |
| ET <sub>O</sub> | Evapotranspiración de referencia  |
| G               | Flujo de calor del suelo  |
| H               | Flujo de calor sensible al aire   |
| INIA            | Instituto Nacional de Innovación Agraria                                    |
| IAF             | Índice de Área Foliar   |
| LE              | Flujo de calor latente  |
| METRIC          | Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration |
| NDVI            | Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada                              |
| R <sup>2</sup>  | Coefficiente de determinación   |
| R <sub>n</sub>  | Radiación neta  |
| SENAMHI         | Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú                     |
| UAV             | Unmanned Aerial Vehicle (Vehículo Aéreo No Tripulado)                       |
| UNALM           | Universidad Nacional Agraria la Molina                                      |



## RESUMEN

En vista de la escasez actual de agua, es de vital importancia llevar a cabo investigaciones sobre nuevas técnicas de riego que puedan ayudar a optimizar el manejo de este recurso en los cultivos. Por lo tanto, se propone evaluar la evapotranspiración como indicador de las pérdidas de agua en el cultivo de arroz, con el objetivo de lograr un riego eficiente sin afectar su rendimiento. En cuanto a la metodología utilizada, se realizaron diferentes regímenes de riego, incluyendo el riego de alternancia de humedecimiento y secado (AWD (AWD<sub>5</sub>, AWD<sub>10</sub> y AWD<sub>20</sub>)) y el riego por inundación continua (CF). Durante las diferentes etapas fenológicas, se midieron índices de vegetación en el campo y se capturaron imágenes térmicas y multiespectrales con un vehículo aéreo no tripulado (UAV), realizando un total de 13 monitoreos. Como resultado, se obtuvieron valores promedio de  $5,24 \pm 0,28$  y  $5,45 \pm 0,31$  mm d<sup>-1</sup> para la evapotranspiración del cultivo (ET<sub>C</sub>) en los sistemas de riego por AWD y CF, respectivamente. Requiriendo como valor de riego promedio de 14363,3 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> para AWD y como valor de riego de 19970 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> para CF. Esto representa un ahorro de agua entre 27,54 a 28,49% y una reducción del rendimiento entre 2,07 a 15,41%. Lo que se traduce en un incremento en la eficiencia del uso de agua entre 18,30 a 36,38% para la tecnología de riego AWD. Dado que estos resultados brindan información importante para mejorar la gestión del riego, se aconseja usar el modelo propuesto para minimizar el efecto negativo en la productividad de la cosecha.

**Palabras clave:** UAV, METRIC, inundación continua (CF), AWD, imágenes multiespectrales, imágenes térmicas, arrozales.

## ABSTRACT

In view of the current water shortage, it is vitally important to carry out research on new irrigation techniques that can help optimize the management of this resource in crops. Therefore, it is proposed to evaluate evapotranspiration as an indicator of water losses in rice cultivation, with the objective of achieving efficient irrigation without affecting its performance. Regarding the methodology used, different irrigation regimes were carried out, including alternating wetting and drying (AWD (AWD<sub>5</sub>, AWD<sub>10</sub> y AWD<sub>20</sub>)) irrigation and continuous flooding irrigation (CF). During the different phenological stages, vegetation indices were measured in the field and thermal and multispectral images were captured with an unmanned aerial vehicle (UAV), performing a total of 13 monitoring sessions. As a result, average values of  $5,24 \pm 0,28$  and  $5,45 \pm 0,31$  mm d<sup>-1</sup> were obtained for crop evapotranspiration (ET<sub>C</sub>) in the AWD and CF irrigation systems, respectively. Requiring an average irrigation value of 14363.3 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> for AWD and an irrigation value of 19970 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> for CF. This represents a savings in irrigation water between 27.54 to 28.49% and a reduction in yield between 2.07 to 15.41%. Which translates into an increase in water use efficiency between 18,30 to 36,38% for AWD irrigation technology. Since these results provide important information to improve irrigation management, it is advisable to use the proposed model to minimize the negative effect on crop productivity.

**Keywords:** UAV, METRIC, continuous flooding (CF), AWD, multispectral imaging, thermal imaging, rice paddies.

## I. INTRODUCCIÓN

Aunque el arroz es el alimento básico y en la mayoría necesario para más de la mitad de la población global, su cultivo demanda una considerable cantidad de agua (Vijayakumar *et al.*, 2022). La Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO) menciona que el cultivo de arroz representa entre 34 a 43% del uso mundial de agua de riego. El arroz cumple un rol esencial en la garantía de la alimentación en numerosos países que están en vías de desarrollo, y la escasez de agua puede llevar a una disminución en su producción, lo que afectaría directamente la seguridad alimentaria, como señala Surendran *et al.* (2021).

La gestión de las malas hierbas, así como también el método de riego son elementos esenciales para el desarrollo y producción del arroz (Loor *et al.*, 2017), pues la disminución del recurso hídrico destinados al cultivo de arroz puede alterar a su control de malezas y dar como resultado una menor productividad agrícola. Sin embargo, el uso excesivo de este recurso también puede aumentar la salinización y el encharcamiento, lo que a su vez disminuye aún más la productividad agrícola, tal como advierte Surendran *et al.* (2021).

Es imprescindible conocer el requerimiento de agua en los cultivos para poder planificar adecuadamente el riego y optimizar la utilización del agua para aumentar su eficiencia. Además, proporcionar la cantidad adecuada de agua de riego para cubrir totalmente sus requerimientos en cada fase de crecimiento, es vital para su evolución. En este sentido, uno de los indicadores más relevantes es la evapotranspiración (ET).

De acuerdo con Sánchez (2001), existen dos categorías principales de métodos para determinar la evapotranspiración. Por un lado, se encuentran los métodos directos de medición, los cuales se centran en el uso de lisímetros y sensores de humedad del suelo. Por otro lado, están los métodos indirectos de estimación. Si bien los métodos de medición directa proporcionan valores más precisos y confiables, su implementación puede ser complicada debido a la necesidad de instrumentos específicos.

El modelo METRIC (*Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration*) es una herramienta que calcula la Evapotranspiración (ET) utilizando imágenes de satélite para realizar un balance de energía (Santos *et al.*, 2010). Además, la utilización de imágenes de resolución alta facilita una selección más efectiva de la superficie (incluyendo suelo y vegetación) en áreas heterogéneas, lo que a su vez potencia la eficacia del modelo METRIC (Ortega *et al.*, 2016).

Los UAV (Vehículo Aéreo No Tripulado) son sistemas tecnológicamente avanzados, altamente eficientes y económicos en comparación con otras opciones como los satélites y los sistemas aéreos tripulados (Padua *et al.*, 2017). La incorporación de cámaras multiespectrales y térmicas en un UAV ha mejorado significativamente la determinación del flujo energético, en la cubierta vegetal como también en suelo. Esto ha ayudado a mejorar la exactitud de los modelos que estiman la evapotranspiración (Ortega *et al.*, 2016).

Actualmente se están investigando tecnologías innovadoras para mejorar la gestión del riego y la optimización del uso del agua en la siembra de arroz. Sin embargo, además de la eficiencia, es importante analizar el impacto de estas tecnologías en términos de costos, efectividad y rendimiento. El cultivo tradicional de arroz utiliza inundaciones continuas, que son altamente productivas, pero requieren grandes cantidades de agua y tienen impactos negativos dentro del entorno natural (Kumar *et al.*, 2021).

El método de irrigación AWD (alternancia de humedecimiento y secado), desarrollada por IRRI (*International Rice Research Institute*), se define como un régimen de riego para reducir el agua deliberadamente durante las etapas del cultivo (Han *et al.*, 2018). Entonces, el riego AWD se muestra como una alternativa prometedora ya que permite ahorrar agua de manera realista utilizando técnicas amigables con el medio ambiente y económicamente viables.

De acuerdo con la proporción de extracción y accesibilidad del agua en todo el mundo, Perú experimenta una escasez de agua de nivel medio a alto (20 a 40%), según Hussain *et al.*, (2022). Por otro lado, en 2022, la producción de arroz llegó a 2,4 millones de toneladas (19 mil se exportaron, 116 mil se importaron y se consumió un total de 2,6 millones de

toneladas). Las regiones de Lambayeque y La Libertad son las que tienen la producción más alta (INEI, 2022). Además, en enero de 2023, la producción de arroz en cáscara llegó a las 220 mil 101 toneladas, logrando un aumento de 5,0% con referencia al mismo mes del año anterior (2022).

Por lo expuesto, es necesario adquirir datos precisos sobre la evaluación de la ET para una gestión de riego más eficiente en áreas de arroz del norte de Perú, fundamentada en dos principios claves: 1°) Equilibrio energético, utilizando el modelo METRIC con imágenes multiespectrales y térmicas, adquiridas a través de un UAV. 2°) Estimar la  $ET_C$  para diferentes condiciones de manejo de riego.

### **1.1. Objetivo**

Se tiene como objetivo general, proponer una técnica de ahorro de agua a partir del monitoreo de la evapotranspiración obtenida de imágenes multiespectrales y térmicas en arrozales de la región Lambayeque - Chiclayo, la cual se cumplirá con los objetivos específicos que a continuación se mencionan:

- Estimar el índice de área foliar (IAF), concretado con las mediciones obtenidas en campo por el método extractivo.
- Determinar la radiación neta ( $R_n$ ), el flujo del calor sensible del aire ( $H$ ), el flujo de calor del suelo ( $G$ ) y el calor latente ( $LE$ ) para la ecuación de balance de energía por riego inundado (CF) y riego con alternancia de humedecimiento y secado (AWD).
- Estimar la evapotranspiración del cultivo ( $ET_C$ ) por balance de energía a través del modelo METRIC para riego inundado (CF) y riego AWD.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) se considera un componente clave en el ciclo hidrológico y un factor fundamental en el riego, la estimación del rendimiento de los cultivos, la silvicultura y la gestión ambiental que consume alrededor del 50% de la irradiación neta y devuelve el 70% de la precipitación total a la atmósfera (Guo *et al.*, 2017), (Pan *et al.*, 2018). El entendimiento del  $ET_C$  es crucial para comprender el uso del agua por parte de las plantaciones, planificar el riego de manera adecuada, gestionar correctamente los recursos hídricos, maximizar la producción de cultivos y conservar el agua de manera eficiente.

La ET vincula directamente el balance energético con el balance hídrico, una conexión que depende del agua disponible, la energía y la presión de vapor (Dong *et al.*, 2020). Combina dos procesos diferentes: la transpiración de la planta y la evaporación de la superficie terrestre, donde el agua pasa de la fase líquida a la fase gaseosa, ya sea de manera directa o por las plantas (Durán, 2017). Durante las primeras etapas del crecimiento de la planta, la evaporación es el usual medio de pérdida de agua, pero a medida que la cobertura de la planta se comienza a completar, la transpiración se manifiesta como el proceso dominante (Allen *et al.*, 2007). Los procedimientos de evaporación y transpiración pueden ocurrir juntos en determinadas condiciones, son difíciles de separar.

#### 2.1.1. Evaporación

Es el procedimiento a través del cual el agua en su estado líquido vuelve a vapor y se desprende de la superficie donde sucede la evaporación. Por lo que, este proceso se lleva a cabo en varios lugares, como lagos, suelos, ríos, caminos y vegetación húmeda, donde las moléculas de agua líquida se transforman en vapor. Esta transformación necesita energía, la cual tiene como suministro principal la radiación solar directa, aunque la temperatura ambiental también contribuye en una menor proporción.

La evaporación es impulsada por la diferencia de la presión entre el vapor de agua en la superficie que está evaporándose y el vapor de agua en el ambiente circundante. Conforme ocurre la evaporación, el aire alrededor se va saturando de manera gradual, lo que ralentiza el procedimiento hasta detenerse por completo si no hay transferencia de aire húmedo hacia la atmósfera o si no se retira de alrededor de la superficie en la que ocurre la evaporación. La velocidad del viento juega un papel significativo en reemplazar el aire saturado con aire más seco. En general, la evaporación se ve dominada por la radiación solar, la medición del calor en el ambiente, el nivel de humedad y la rapidez del viento (Gao *et al.*, 2017), (Liu *et al.*, 2021). La Figura 1 da a conocer de manera gráfica el proceso de evaporación que se da en los campos de cultivos.



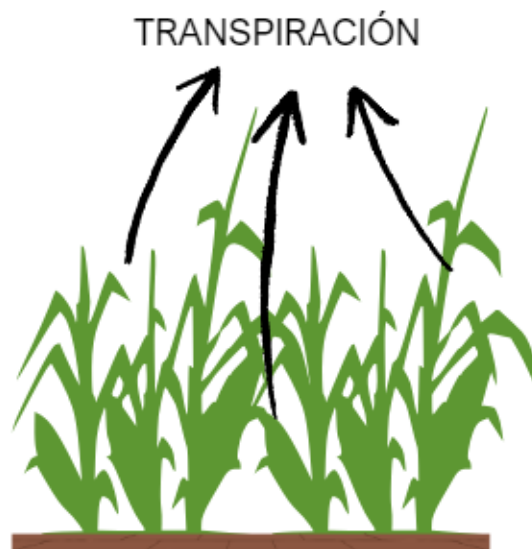
**Figura 1: Proceso de evaporación del cultivo**

### **2.1.2. Transpiración**

Hace referencia al método donde el agua se transporta y se evapora desde la tierra hasta la atmósfera mediante las plantas.

Las estomas, que son diminutas aberturas en las hojas, permiten la transmisión de gases y vapor de agua, lo que provoca que las plantas pierdan agua. Aunque las raíces absorben agua y nutrientes, gran parte de la mayoría del agua absorbida se evapora a través de la transpiración, dejando solo una fracción mínima en los tejidos de la planta.

La transpiración está influenciada por factores climáticos, como la humedad y las condiciones del suelo, así como por la estructura y fisiología de la planta. La transpiración, al igual que la evaporación directa, se rige por la energía recibida, el gradiente de presión de vapor y la velocidad del viento. Entonces, la cantidad de luz solar, la temperatura atmosférica, la humedad y la velocidad del viento también influyen en la transpiración (Gao *et al.*, 2017), (Liu *et al.*, 2021). La Figura 2 da a conocer de manera gráfica el proceso de transpiración que ocurre en las hojas del cultivo.



**Figura 2: Proceso de transpiración del cultivo**

### **2.1.3. Factores que influyen en la evapotranspiración**

#### **a. Factores de cultivo**

El término "tipo y variedad del cultivo" se refiere a las diferentes características que influyen en la tasa de ET de los cultivos, a lo largo de su desarrollo. Estas características incluyen la resistencia a la transpiración, la rugosidad, el reflejo y la altura de la planta. Además, la cubierta terrestre y las propiedades de las raíces de la planta también juegan un papel importante en la ET. Es importante tener en cuenta que, aunque distintas variedades de plantas se hallan en entornos ecológicos parecidos, los valores de ET pueden variar debido a estos factores mencionados anteriormente (Allen *et al.*, 2006).



## **b. Factores climáticos**

Los factores climáticos son fundamentales para la evapotranspiración, entre ellos, los más importantes son: radiación del sol, temperatura del ambiente, humedad del ambiente y rapidez del viento. Existen diversos métodos creados para calcular la evaporación basándose en estos factores (Allen *et al.*, 2006).

## **c. Condiciones y manejo ambiental**

El crecimiento de la planta y la evapotranspiración se ven restringidos por elementos como la alta concentración de sal o la pobreza de nutrientes en el suelo, el uso insuficiente de fertilizantes, la presencia de capas endurecidas del suelo terrestre, la falta de prevención de plagas y enfermedades, y una gestión inadecuada del suelo (Allen *et al.*, 2006). Pan *et al.* (2018) señala que la deposición de nitrógeno actúa como un estimulante eficaz de la transpiración, que es parte del proceso de ET.

## **2.2. Métodos para determinar la evapotranspiración**

### **2.2.1. Balance hídrico**

El análisis del balance de agua nos permite planificar en el ámbito de la agricultura de cultivos, las tareas de regadío necesarias para satisfacer las demandas mencionadas y lograr una producción agrícola óptima (Vieira *et al.*, 2016).

La amplitud de almacenamiento del suelo y los elementos del clima, como el calor, el nivel de humedad, la exposición al sol, la insolación y la velocidad del viento, están relacionados con el balance hídrico (Pérez, 1967). Además, la habilidad de las plantas para absorber agua del terreno varía según el tipo de especie y la succión total. Por lo tanto, tanto las plantas como el suelo tienen su propia capacidad para proporcionar y extraer agua a diferentes niveles de succión matricial (Butler y Prescott, 1965).

### **2.2.2. Balance de energía**

Moguel *et al.* (2001) sugiere que entender el balance energético en los cultivos nos facilita la comprensión y manejo de las corrientes de energía y materia, además de cómo afectan la productividad de las plantas.

El modelo METRIC (Allen *et al.*, 2007) viene ser la versión modificada del modelo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) que calcula el  $ET_c$  con el análisis del balance energético en la superficie, centrado en datos obtenidos vía satélite (Bastiaanssen *et al.*, 1998). Pero la insuficiencia de precisión espacial para investigaciones a nivel de lotes y la pobreza de información en tiempo real (Niu *et al.*, 2020), permitió el uso de los UAV para el desarrollo de imágenes de resolución alta, exentos de fallos atmosféricos y en tiempo real, lo que hace más sencillo el monitoreo de plantaciones homogéneas (Pintér *et al.*, 2022).

La evapotranspiración ( $ET_c$ ) se establece como el residuo de la ecuación de equilibrio energético en la superficie, mediante el flujo de calor latente (LE) (Niu *et al.*, 2020). A partir de la siguiente ecuación, se calcula LE.

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

#### a. Radiación neta ( $R_n$ )

Es la sustracción entre la radiación entrante y radiación saliente de longitudes de ondas cortas y ondas largas que se refiere al equilibrio entre la energía absorbida, reflejada y expulsada por el suelo terrestre. Este equilibrio se puede entender como la discrepancia entre la radiación neta de onda corta que entra y la radiación neta de onda larga que sale (Allen *et al.*, 2006).

$R_n$  simboliza la energía radiante presente en la superficie, que se fracciona en H, G y en LE. Para calcular la radiación, se resta la radiación que salen de todos los flujos radiantes que entran, incluyendo la energía proveniente del sol y el calor (Ecuación 2) (Allen *et al.*, 2007).

$$R_n = R_{s\downarrow} - aR_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow} \quad \dots (2)$$

Donde:  $R_n$  es medido en  $W m^{-2}$ . En cuanto a  $R_{s\downarrow}$ , se refiere a la radiación incidente de onda corta. Por otro lado,  $a$  indica el albedo.  $R_{L\downarrow}$  representa la radiación de onda larga incidente, medida también en vatios por metro cuadrado, mientras que  $R_{L\uparrow}$  denota la radiación de onda larga expulsada. Finalmente,  $\epsilon_0$  es la emisividad térmica del suelo.

$R_{s\downarrow}$  se determina a través del uso de la constante solar, el ángulo en el que los rayos solares golpean la Tierra, una distancia proporcional entre la Tierra y el Sol, y una transmisividad

atmosférica que se calcula.  $R_{L\downarrow}$  se calcula usando una versión modificada de la ecuación de Stefan-Boltzmann que incluye la transmisividad atmosférica y una temperatura de referencia seleccionada para la superficie.

$R_{L\uparrow}$ , se determina mediante la ecuación de Stefan-Boltzmann con la emisividad ( $\epsilon_0$ ) de la superficie terrestre y la temperatura de la tierra calculada previamente. Para determinar las temperaturas de la superficie, se emplean datos de imágenes de resolución alta en la banda térmica. Usualmente,  $R_n$  es positiva durante el día, sin embargo, es negativa durante la noche. En condiciones normales, el valor total diario de  $R_n$  es mayormente siempre positivo durante todo el día, a excepción de situaciones extremas en latitudes altas (Allen *et al.*, 2002).

- Cálculo de la capacidad de emisión de calor de la superficie ( $\epsilon_0$ )

Se realiza a partir del IAF, si el IAF supera el valor de 3, entonces el  $\epsilon_0$  se tomará como 0,98.

En caso contrario, se aplicará la ecuación propuesta por Allen *et al.*, (2007).

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01 * IAF \quad IAF \leq 3 \quad \dots \dots (3)$$

Dónde:  $\epsilon_0$  es la emisividad térmica de la superficie de la tierra.

- Transmisividad atmosférica ( $T_{SW}$ )

La fórmula propuesta por Bastiaanssen *et al.* (1995) se utiliza para determinar la transmisividad atmosférica.

$$T_{SW} = 0,75 + 2 * 10^{-5} * Z \quad \dots \dots (4)$$

Donde: Z representa la altura por encima del nivel del mar, medida en metros. Esto es lo que se conoce como el modelo digital de superficie (DSM).

- Radiación de onda larga incidente ( $R_{L\downarrow}$ )

Se refiere al flujo descendente de radiación térmica que proviene de la atmósfera. Frecuentemente, se aplica la ecuación de Stefan-Boltzman para su cálculo, tal como lo sugieren Allen *et al.* (2007).

$$R_{L\downarrow} = \epsilon_a * \sigma * (T_a)^4 \quad \dots \dots (5)$$

Dónde:  $\varepsilon_a$  representa a la emisividad atmosférica,  $\sigma$  viene ser la constante de Stefan-Boltzmann  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ,  $T_a$  es la temperatura del aire (ambiente) cerca de la superficie en  $^{\circ}\text{K}$ .

La estimación de  $\varepsilon_a$  se realiza a través de la aplicación de la ecuación propuesta por Bastiaanssen (1995).

$$\varepsilon_a = 0,85 * (-\ln(T_a))^{0,09} \dots \dots (6)$$

- Radiación de onda larga saliente ( $R_{L\uparrow}$ )

El flujo de radiación térmica que va desde la superficie terrestre hacia el exterior (la atmósfera), conocido como radiación de onda larga saliente, se calcula utilizando la ecuación de Stefan - Boltzmann. Esta radiación se mide en  $\text{W m}^{-2}$ :

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 * \sigma * (T_S)^4 \dots \dots (7)$$

Dónde:  $T_s$  representa a la temperatura superficial, en  $^{\circ}\text{K}$ .

- Distancia relativa entre la tierra y el sol ( $dr$ )

Allen *et al.* (2006) explican que la variable  $dr$  está determinada por la ecuación  $1/(dt^{-s})^2$ . Representa el distanciamiento relativo entre la Tierra y el Sol, medida en unidades astronómicas (AU). Una AU equivale a  $1,496 \times 10^8$  kilómetros. Esta distancia se puede observar en la mitad de cada imagen.

$$Dr = 1 + 0,033 * \cos\left(DOY * \frac{2\pi}{365}\right) \dots \dots (8)$$

Dónde: DOY se refiere al día juliano y su ángulo, calculado como  $(DOY * 2\pi/365)$ , se presenta en radianes. Los valores de  $dr$  que son adimensionales, se encuentran dentro de un rango que va desde 0,97 hasta 1,03.

- Radiación de onda corta entrante ( $R_{S\downarrow}$ )

Se calcula teniendo en cuenta diversos factores como el tiempo, la fecha, la ubicación, la pendiente del terreno y el aspecto. Para realizar estos cálculos se consideran condiciones de

cielo despejado, pues es requisito indispensable para utilizar la imagen (Allen *et al.*, 2007).

$$R_{S\downarrow} = G_{sc} * \cos(\theta) * dr * T_{SW} \dots \dots (9)$$

En la ecuación,  $R_{S\downarrow}$  representa la radiación de onda corta incidente o que entra;  $G_{sc}$  es la representación de la constante atmosférica solar; y finalmente,  $\cos(\theta)$  es el coseno de la incidencia solar.

El cálculo del coseno de incidencia solar ( $\cos\theta$ ) se realiza teniendo en cuenta las correcciones por pendiente y aspecto del terreno. Cada píxel de la imagen se ajusta según la orientación de la pendiente para determinar la cantidad de radiación recibida. La influencia de la disposición del terreno y la ubicación del sol en la radiación se explica mediante la siguiente ecuación, según un estudio realizado por Allen *et al.* (2006).

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(\delta) \sin(\phi) \cos(i) - \sin(\delta) \cos(\phi) \sin(i) \cos(a) + \cos(\delta) \cos(\phi) \\ & \cos(i) \cos(\omega) + \cos(\delta) \sin(\phi) \sin(i) \cos(a) \cos(\omega) + \cos(\delta) \sin(i) \\ & \sin(a) \sin(\omega) \dots \dots (10) \end{aligned}$$

Dónde:

$\phi$  es latitud del área de estudio ingresa como grilla en radianes,

$i$  es la pendiente del área de estudio ingresa en radianes,

$a$  es el azimut y se encuentra en el meta dato de cada imagen,

$\omega$  ángulo de horas de sol estimado en base al instante del vuelo con el UAV,

$\delta$  es la declinación solar calculado en base al día juliano (D) y se estima con la siguiente expresión:

$$\delta = 23,45 \times \text{sen} \left( \frac{360 \times (284 + D)}{365} \right) \dots \dots (11)$$

Todas las variables antes mencionadas deben estar en radianes.

#### **b. Flujo de calor del suelo (G)**

De acuerdo con Allen *et al.* (2007), se refieren a la tasa a la que se acumula el calor en el suelo y la vegetación a través del proceso de conducción. En el marco de las aplicaciones del modelo de balance de energía METRIC, normalmente se estima G como una proporción

$G Rn^{-1}$ . Su origen depende de la variación de temperatura en la capa más superficial del suelo. Este cambio de temperatura se ve alterado de la presencia de vegetación y el IAF. Además, la radiación neta tiene un impacto tanto en la temperatura de la superficie como en el gradiente de temperatura del suelo. Con base en estos factores, es posible calcular  $G$  utilizando la proporción  $G Rn^{-1}$ . La fórmula para calcular el flujo de calor en el suelo está representada por la ecuación (12), según Bastiaanssen (2000).

$$G Rn^{-1} = \frac{T_s - 273,15}{a} (0,0038a + 0,0074a^2)(1 - 0,98NDVI^4) \times Rn$$

$$G = \frac{T_s - 273,15}{a} (0,0038a + 0,0074a^2)(1 - 0,98NDVI^4) \times Rn \dots \dots (12)$$

Donde:

$T_s$  se refiere a la temperatura en la superficie expresada en Kelvin,  $a$  representa el albedo, mientras que NDVI es una medida conocida como el índice de vegetación de diferencia normalizada que se utiliza para evaluar la vegetación en un área determinada.

### c. Flujo de calor sensible del aire (H)

Se refiere a la pérdida de calor del aire mediante los procesos de convección y conducción, que sucede como resultado de una diferencia de temperatura. Para calcular este parámetro, se hace uso de la ecuación sugerida por Allen *et al.* (2002).

$$H = \frac{\rho \times C_p \times dT}{r_{ah}} \dots \dots (13)$$

Donde:

$\rho$  representa la densidad del aire en kilogramos por metro cúbico ( $kg m^{-3}$ ).  $C_p$  es la designación para la capacidad de calor específico del aire, cuyo valor es  $1004 J kg^{-1}K^{-1}$ .  $dT$  se refiere a la variación de la temperatura entre dos alturas diferentes, especificadas como  $T_1 - T_2$  y las alturas son indicadas como  $z_1$  y  $z_2$ . Finalmente,  $r_{ah}$  simboliza la resistencia aerodinámica en el transporte de calor sensible desde la superficie hasta una altura de referencia, y se mide en segundos por metro ( $s m^{-1}$ ).

- Resistencia aerodinámica ( $r_{ah}$ )

Es necesario realizar varias repeticiones para obtener el valor de  $r_{ah}$ , tomando en cuenta las

consecuencias de la volatilidad del clima. Se emplea la ecuación (14) para determinar el valor inicial de  $r_{ah}$ , manifestando que las condiciones atmosféricas son neutrales.

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u_* \times k} \dots \dots (14)$$

Donde:

$z_1$  y  $z_2$  representan las alturas en metros por encima de la superficie (normalmente,  $z_1$  se establece en 0,1 m, cerca del suelo, y  $z_2$  en 2,0 m, que es la altura de la vegetación) según Bastiaanssen *et al.* (1998). Por otro lado,  $k$  es la representación de la constante de Von Karma, establecida en 0,41. Finalmente,  $u_*$  es la rapidez de la fricción que se mide en metros por segundo al cuadrado inverso ( $m s^{-1}$ ).

La rapidez de fricción se halla utilizando el perfil logarítmico del viento en condiciones de estabilidad neutra:

$$u_* = \frac{ku_{200}}{\ln\left(\frac{200}{Z_{om}}\right)} \dots \dots (15)$$

Donde:

$u_{200}$  se refiere a la rapidez del viento, medida en  $m s^{-1}$ , a un alto de 200 metros.  $Z_{om}$  representa al coeficiente de rugosidad y es medido en metros (m).

Para determinar la rapidez del viento a una altura de 200 m, se utiliza una fórmula que no toma en cuenta los efectos producidos por rugosidad de la superficie de la tierra:

$$u_{200} = u_* \frac{\ln\left(\frac{200}{Z_{om}}\right)}{k} \dots \dots (16)$$

El coeficiente de rugosidad de la superficie ( $Z_{om}$ ) se relaciona con el alto del cultivo por encima del plano, que se establece como cero y se identifica con el punto donde la rapidez del viento se torna cero al terminar la cubierta vegetativa (Nuñez, 2009). Para calcular  $Z_{om}$ , se emplea una relación empírica sugerida por Bastiaanssen, (2000).

$$Z_{om} = 0,12 \times h \dots \dots (17)$$

Donde:

$h$  se refiere al alto que alcanza el cultivo situado debajo de la estación meteorológica.

- Diferencia de temperatura ( $dT$ )

En el proceso de calcular la diferencia de temperatura ( $dT$ ) cerca de la superficie, se establece una relación lineal entre  $dT$  y  $T_s$  para cada píxel.

$$dT = b + aT_s \dots \dots (18)$$

Donde:

$T_s$  se refiere a la temperatura en la superficie, mientras que  $a$  y  $b$  son los coeficientes que determinan la correlación.

Para determinar los coeficientes se emplean dos puntos de referencia denominados "píxel frío" y "píxel caliente". El píxel frío se identifica como una zona agrícola completamente cubierta y bien irrigada, donde se considera que la temperatura de la superficie y la del aire son prácticamente iguales. En contraste, el píxel caliente se selecciona de una región seca y carente de vegetación, donde se presume que la evapotranspiración es nula.

- Densidad del aire ( $\rho$ )

La determinación de la densidad del aire se lleva a cabo mediante la aplicación de ecuaciones estándar que consideran a ley universal de los gases y la presión atmosférica, como fue evidenciado por Allen *et al.* (2002):

$$\rho_{air} = \frac{1000P}{1,01(T_s - dT)R} \dots \dots (19)$$

Donde:

La densidad del aire se denota como  $\rho_{air}$ , mientras que  $R$  representa la constante específica del gas, que es  $287 J kg^{-1} K^{-1}$ .  $T_s - dT$  se usa para referirse a la temperatura del aire en las proximidades de la superficie en un píxel específico. Por otro lado,  $p$  simboliza el promedio de la presión atmosférica en la elevación del píxel, que se determina mediante un cálculo exponencial, según Walter *et al.* (2001).



$$p = 101,3 \left( 293 - \frac{0,0065z}{293} \right)^{5,26} \dots \dots (20)$$

Donde:

Environmental & Water Resources Institute (EWRI) utiliza 293 como la temperatura estándar del aire (en grados Kelvin) en su estandarización de la ET. Z se utiliza para indicar el alto con respecto al nivel del mar.

### **2.3. Análisis de varianza no paramétrico**

#### **2.3.1. Test de Kruskal-Wallis**

Se trata de una ampliación de la prueba U de Mann-Whitney y constituye un sustituto sobresaliente al ANOVA de factor único completamente aleatorio. La técnica de Kruskal-Wallis, desarrollada por William Kruskal y W. Allen Wallis, es un método no paramétrico que se utiliza para verificar si hay o no una variación estadísticamente relevante entre las medias o medianas de tres o más grupos independientes y da la opción de descartar esta suposición de igualdad cuando el valor de p sea superior a 0,05 (Soto, 2013).

#### **2.3.2. Prueba de Dunn**

El método de Dunn es el método adecuado para realizar comparaciones múltiples no paramétricas por pares cuando se descarta un análisis de Kruskal-Wallis.

### **2.4. Antecedentes**

Quille *et al.* (2019) investigó tres diferentes tipos de estrés hídrico relacionados con el potencial hídrico del suelo (SWP). El propósito era evaluar su impacto en la altura del cultivo de arroz y utilizar índices de vegetación (IAF y NDVI) obtenidos de imágenes de drones o UAV. Los hallazgos del estudio mostraron una correlación entre 0,85 y 0,89 y entre 0,77 y 0,95 para IAF y NDVI, respectivamente, con respecto a la altura del cultivo de arroz. Este trabajo de investigación confirma que es factible usar índices de vegetación para monitorear la falta de agua en las plantas cultivadas.

En su trabajo de grado de Quispe (2021) utilizó imágenes multiespectrales para calcular la ET en tres variedades de arroz: IR717006, IR43 y Sahood Ulan 12, durante el periodo de brotación. Esta información se obtuvo a través de un UAV, y se aplicaron los modelos SEBAL y METRIC. Según los resultados, los valores medios de Rn, G, H y LE del cultivo de arroz fueron 638,76, 84,45, 350,14, 205,10 respectivamente, usando el modelo METRIC. Además, se determinó que la evapotranspiración oscilaba entre 2,66 y 6,24 mm d<sup>-1</sup>.

En el estudio de Machaca *et al.* (2022) titulado “Uso de imágenes de dron para la determinar la ET en olivares de áreas áridas para optimizar el riego: un estudio de caso en La Yarada, Tacna, Perú”, se aplicaron técnicas de teledetección usando un Sistema de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS) para calcular la evapotranspiración de cultivos (ET<sub>C</sub>) en árboles de oliva (*Olea europaea L.*), ubicados en la zona costera del sur de Perú. El propósito del estudio fue calcular la ET<sub>C</sub> en olivares utilizando el modelo METRIC, basándose en imágenes multiespectrales y térmicas capturadas por un RPAS, que fue previamente calibrado vicarialmente variedad de formas en el terreno, utilizando un espectrómetro de radiación y un radiómetro móvil. Se registraron promedios de ET<sub>C</sub> entre 2,86 y 2,94 mm d<sup>-1</sup>, ascendiendo a 4,02 mm d<sup>-1</sup> en la temporada invernal (durante la floración) y a 4,53 mm d<sup>-1</sup> en el periodo de verano (durante la fructificación). Por otro lado, los valores de ET<sub>0F</sub> fluctuaron entre 0,88 y 1,67 y entre 0,92 y 1,42 mm d<sup>-1</sup> en los periodos de invierno y verano respectivamente, mostrando variaciones significativas entre las estaciones. Los valores que superaron el 1,0 mostraron una mayor fluctuación y tendieron a ser un poco más elevados durante el periodo invernal, lo que se atribuye a la implementación de un riego diario durante todo el año para combatir el estrés abiótico causado por la salinidad del suelo.

La Tabla 1, presenta los valores de ET para distintas condiciones del clima, sistema o técnica de riego y métodos de estimación; con valores máximas para clima árido (Pakistán).

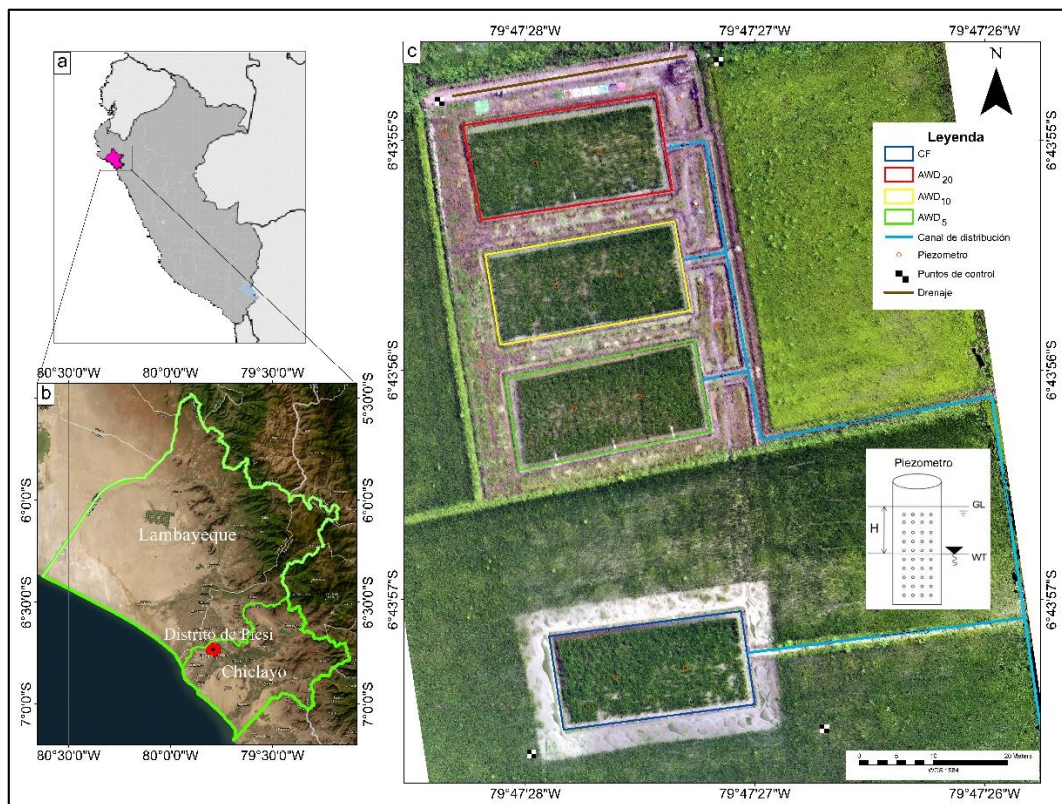
**Tabla 1: Valores de evapotranspiración (ET) de diferentes estudios presentados**

| Clasificación climática Köppen-Geiger | Riego              | Método para estimar $ET_c$                           | $ET_c$ (mm d <sup>-1</sup> ) | Zona de estudio | Referencia                    |
|---------------------------------------|--------------------|--|------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| Árido cálido                          | Goteo              | balance hídrico (lisímetro)                          | 1,75 - 5,16                  | Perú            | Neira <i>et al.</i> (2020)    |
| Árido cálido                          | Goteo              | balance de energía ( <i>METRIC</i> )                 | 1,65 - 7,48                  | Perú            | Quille <i>et al.</i> (2021)   |
| Árido                                 | Inundado           | balance hídrico ( <i>Croptwat</i> )                  | 2 - 8,51                     | Pakistán        | Hussain <i>et al.</i> (2023)  |
| Árido                                 | Regímenes de riego | balance hídrico (AquaCrop)                           | 0,3 - 5,5                    | Egipto          | Elsadek <i>et al.</i> (2023)  |
| Árido templado                        | Inundado y AWD     | balance de energía ( <i>METRIC</i> )                 | 7,07 - 6,54                  | Perú            | Ramos <i>et al.</i> (2024)    |
| Húmedo tropical                       | Inundado           | balance de energía ( <i>SEBAL</i> )                  | 0 - 5,44                     | Costa de Marfil | Kra <i>et al.</i> (2023)      |
| Húmedo tropical                       | Inundado           | balance de energía ( <i>SEBAL</i> )                  | 5,52 - 6,17                  | Burkina Faso    | Sawadogo <i>et al.</i> (2020) |
| Mediterráneo de veranos frescos       | Inundado           | balance de energía ( <i>METRIC</i> )                 | 2,1 - 4,7                    | Portugal        | Ferreira <i>et al.</i> (2023) |
| Templado                              | Inundado           | balance de energía ( <i>SEBAL</i> y Eddy Covariance) | 5,30 y 5,20                  | Korea del sur   | Lee & Kim (2016)              |

### III. METODOLOGÍA

#### 3.1. Zona de estudio

Se llevó a cabo en la región Lambayeque, costa norte del Perú (Figura 3), con campos de arroz distribuidos en parcelas experimentales instaladas en la Estación Experimental Agraria (EEA) "Vista Florida" del INIA, ubicada en el distrito de Pisci y en la provincia de Chiclayo. La campaña agrícola se prolongó de enero a junio 2023, iniciándose con el reconocimiento de los campos de arroz en la región Lambayeque. Siendo la variedad de arroz que se empleó INIA 515 - Capoteña (Ver Tabla 2).



**Figura 3: Ubicación de las parcelas a nivel nacional**

Nota: (a), ubicación de las parcelas a nivel Departamental (b), Variabilidad espacial de las parcelas de arroz en el INIA Vista Florida (c)

**Tabla 2: Características de la zona de estudio**

| Zona               | Longitud      | Latitud        | Altitud (m.s.n.m) | Área (ha) | N° parcelas | Variedad            |
|--------------------|---------------|----------------|-------------------|-----------|-------------|---------------------|
| INIA-Vista Florida | 06°43'56,55"S | 79°47'27,55" W | 35                | 0,11      | 4           | INIA 515 - Capoteña |

El lugar de la investigación se caracteriza por un clima desértico subtropical, con temperaturas que oscilan entre un mínimo de 15 °C y un máximo de 30 °C. Experimenta lluvias fuertes en verano (de febrero a abril) y precipitaciones moderadas, pero poco comunes en invierno, lo que indica que es una región con baja precipitación anual.

Siendo el desarrollo y crecimiento del cultivo entre enero a junio del año 2023, un ciclón tropical desorganizado denominado “Ciclón Yaku” estuvo presente cerca de la costa norte y central hasta el 18 de marzo (73 DDS) (SENAMHI, 2023). Esta presencia contribuyó a la infiltración y acumulación de humedad en la cuenca occidental. Como resultado, se produjeron fuertes lluvias y registros diarios de precipitaciones sin precedentes a lo largo de la costa norte, lo que afectó significativamente el régimen hidrológico durante el período experimental.

### 3.1.1. Manejo de riego

La adquisición del agua para el riego proviene de un canal que se abastece del reservorio Tinajones, el cual es administrado por la comisión de regantes de Capote. El diseño del estudio fue experimental con observación y consistió en cuatro parcelas, con medidas de 24 m x 11 m (Figura 3c).

El primer tratamiento fue con riego por inundación continua (CF), y los tratamientos restantes con riego bajo alternancia de humedecimiento y secado (AWD<sub>5</sub>, AWD<sub>10</sub> y AWD<sub>20</sub>). En los tratamientos AWD<sub>5</sub>, AWD<sub>10</sub> y AWD<sub>20</sub>, los piezómetros fueron ubicados a una altura de 5-, 10- y 20- cm respectivamente, en relación al nivel de la superficie terrestre (que se supervisa a una profundidad de 5 a 20 cm usando el piezómetro) (Tabla 3).

**Tabla 3: Descripción del manejo de riego por tratamiento**

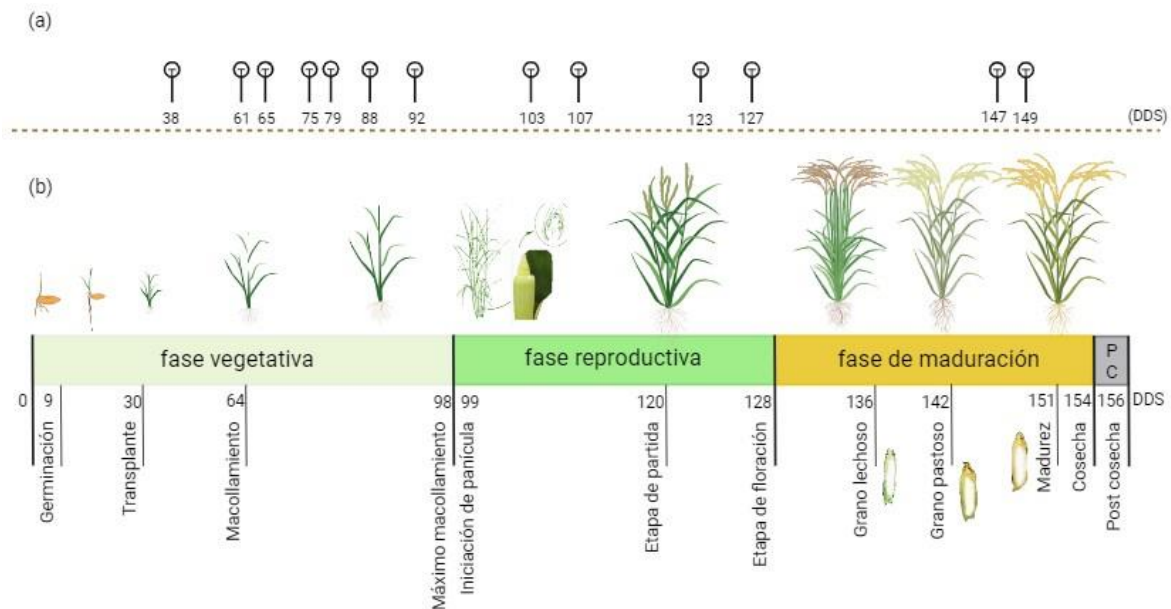
| Repeticiones      | Manejo de riego                    |
|-------------------|------------------------------------|
| CF                | Inundado (testigo)                 |
| AWD <sub>5</sub>  | cm respecto al nivel del suelo 5-  |
| AWD <sub>10</sub> | cm respecto al nivel del suelo 10- |
| AWD <sub>20</sub> | cm respecto al nivel del suelo 20- |

Los tratamientos AWD se iniciaron desde la fase de macollamiento y continuaron hasta la fase de floración. El AWD<sub>20</sub> fue el más extremo, se obtuvo la temperatura seca. Respecto al tratamiento CF, al ser un riego por inundación, resultó la condición de menos estrés.

La clasificación del agua de riego se determinó como C<sub>2</sub> – S<sub>1</sub>, lo que indica que contiene una cantidad reducida de sodio y sal, con un índice de absorción de sodio (RAS) de 0,55. Además, presenta las siguientes características químicas: potencial de hidrógeno (pH) de 7,34, conductividad eléctrica (EC) de 0,31 dS m<sup>-1</sup>, cationes como Ca<sup>2+</sup> (1,91 meq L<sup>-1</sup>), Mg<sup>2+</sup> (0,43 meq L<sup>-1</sup>), Na<sup>+</sup> (0,59 meq L<sup>-1</sup>) y K<sup>+</sup> (0,10 meq L<sup>-1</sup>), y los aniones Cl<sup>-1</sup> (1,00 meq L<sup>-1</sup>), HCO<sub>3</sub><sup>-2</sup> (1,89 meq L<sup>-1</sup>) y SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> (0,29 meq L<sup>-1</sup>).

### 3.1.2. Manejo del cultivo

La siembra de la variedad INIA 515 – Capoteña fue por almácigo el 02 de enero del 2023. Treinta días después de la siembra (DDS) (Figura 4), se trasplantaron dos plántulas por golpe a una distancia de 0,25 x 0,25 cm. La fertilización fue de 250-106-60 en forma de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), respectivamente. Se aplicó el 100% de P y K, mientras que el nitrógeno se distribuyó de manera equitativa en fase de macollamiento y punto de algodón. La fenología se determinó usando los grados días de calor (GDD), un índice útil para identificar el crecimiento del cultivo.



**Figura 4: (a) Momentos que se realizaron los vuelos con el UAV según DDS; (b) Fase fenológica del arroz de acuerdo a los días después de la siembra (DDS)**

Se utilizaron insecticidas para controlar la presencia de *Chironomus sp.* y *Hydrellia wirthii*, durante la etapa vegetativa del cultivo de arroz. Además, se aplicó fungicidas en la fase de grano lechoso para evitar enfermedades causadas por el hongo *Villosiclava virens*.

### 3.1.3. Características del suelo

El suelo es de textura franco arenosa (26% arena, 39% limo, 35% arcilla), porosidad de 47,2%, densidad aparente (da) de 1,41 g cm<sup>-3</sup>, densidad real (dr) 2,67 g cm<sup>-3</sup>, capacidad de campo (CC) de 29,76 %, punto de marchitez permanente (PMP) de 16,27 % (Tabla 4), y como características químicas presenta una CE de 0,42 dS m<sup>-1</sup>, pH de 7,64, capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 220 meq kg<sup>-1</sup>, materia orgánica (MO) de 1,22%, N total de 0,11%, C orgánico de 0,71%, S disponible de 3,76 ppm, CaCO<sub>3</sub> de 4,02%, P de 12 ppm y K de 376 ppm.

**Tabla 4: Características físicas del suelo**

| Zona               | Textura del suelo |           |        | Textura        | Densidad aparente (g cm <sup>-3</sup> ) | Densidad real (g cm <sup>-3</sup> ) | Capacidad de campo (%) | Punto de Marchitez (%) |
|--------------------|-------------------|-----------|--------|----------------|---|-------------------------------------|------------------------|------------------------|
|                    | % Arena           | % Arcilla | % Limo |                |   |                                     |                        |                        |
| INIA-Vista Florida | 26                | 39        | 35     | Franco arenosa | 1,41                                    | 2,67                                | 29,76 ± 1,38           | 16,27 ± 1,25           |

### 3.1.4. Colecta de imágenes multispectrales y térmicas

Se realizaron los monitoreos aéreos con un UAV Matrice 300 (DJI, Shenzhen, China), equipado con una cámara multispectral Parrot Sequoia (Parrot S.A., París, Francia) y una cámara térmica DJI Zenmuse H20T (DJI, Shenzhen, China); durante 13 días de monitoreo, distribuidos durante el desarrollo del cultivo.

La cámara multispectral se calibró con un panel de reflectancia llamada AIRNOV. La cámara H20T colectó imágenes térmicas y ópticas en formato TIF radiométrico. En la Tabla 5 se proporcionan detalles adicionales sobre las especificaciones de los sensores.

**Tabla 5: Características de las cámaras**

| UAV                   | Sensores          | Imágenes      | Banda espectral (nm)/<br>precisión  | Distancia<br>focal (mm) | Resolución  |
|-----------------------|-------------------|---------------|---|-------------------------|-------------|
| Matrice<br>300<br>RTK | Parrot<br>Sequoia | Multispectral | Verde (550±40),<br>Rojo (660±40),<br>Borde rojo (735± 10),<br>Infra rojo cercano (790±40) | 3,98                    | 1280 x 960  |
|                       | Zenmuse<br>H20T   | Térmico       | 8000-14000/ ( $\pm 0,2 \text{ m} + D \times$<br>0,15 %)                                   | 13,5                    | 640 x 512   |
|                       |                   | RGB           | D es la distancia a una<br>superficie vertical  | 4,5                     | 4056 x 3040 |

Se instalaron 4 puntos de control en suelo para la georreferenciación de la cámara térmica, las cuales fueron bloques de concretos pintados de blanco y negro, y en algunos casos forrados con papel aluminio.

Se utilizó la aplicación DJI Pilot V 2.5.1.15 para programar el itinerario de vuelo, con una velocidad de vuelo, traslape frontal y lateral, y altura de vuelo, según se detalla en la Tabla 6. Con el objetivo de reducir el ruido provocado por las sombras del dosel de la planta, las imágenes se tomaron en el horario comprendido entre las 09:00 y las 11:30 am. en condiciones de cielo despejado sugerido por Quille *et al.* (2021).

Los vuelos con el UAV se realizaron en las siguientes fechas: 11 de febrero; 6, 10, 20 y 24 de marzo; 2, 6, 17 y 21 de abril; 7, 11 y 31 de mayo; 2 de junio.



**Tabla 6: Plan de vuelo**

| Sector                | Resolución<br>cm/pixel | Traslape<br>frontal % | Traslape<br>lateral % | Velocidad<br>m/s | Altura<br>m | Tiempo<br>de vuelo | Área<br>(has) |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-------------|--------------------|---------------|
| INIA Vista<br>Florida | 2,7                    | 85                    | 80                    | 1,5              | 45          | 10'56''            | 0,5           |

### 3.2. Materiales y equipos

Los equipos y materiales empleados en el campo de estudio se detallan la Tabla 7.

**Tabla 7: Materiales y equipos**

| Materiales y equipos              | Descripción  | Uso-aplicación  |
|-----------------------------------|--|---|
| Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV) | Marca DJI, Matrice 300 RTK   | Acople de cámaras, sensores térmicos y sensores multiespectrales. |
| Cámara termográfica               | Zenmuse H20T. Resolución 640x512 pixeles, operatividad de -20°C a + 50°C, rango espectral de 7,5 – 13 µm. long. Focal de 13mm, y ancho de sensor de 100,88 | Captura de imágenes térmicas y ópticas (RGB, TIF y Radiométrica). |
| Cámara Multiespectral             | Marca Parrot Sequoia, 4 sensores monocromáticos verde, rojo, borde rojo, infrarojo cercano, sensor de reflectancia Sunshir.                                | Captura de imágenes en bandas (Blue, Green, Red, Red Edge y NIR). |
| Cámara RGB                        | Zenmuse X4S 8.8mm, resolución 20 MP  | Captura de imágenes en bandas RGB.                                |
| Estación meteorológica portátil   | ATMOS 41   | Obtención de data meteorológica.                                  |
| Radiómetro                        | Modelo MI-210 Apogge, con 200 gramos de peso.  | Medir la intensidad de la radiación solar.                        |
| GreenSeaker™                      | Reflectómetro portátil, marca Trimble.   | Medición de datos del NDVI.                                       |

La Tabla 8 muestra las herramientas computacionales necesitados durante el estudio, así como la descripción del uso que se les dio.

**Tabla 8: Herramientas computacionales utilizadas en la investigación**

| Software      | Descripción  |
|---------------|--|
| Pix4D 4.5.6   | Es un software para fotogrametría profesional, la obtención de ortomosaicos, el pre - procesamiento de las imágenes térmicas, multiespectrales e imágenes RGB. |
| ArcGIS 10.5.1 | Para realizar procesamientos de ortomosaicos, imágenes térmicas e imágenes multiespectrales.   |

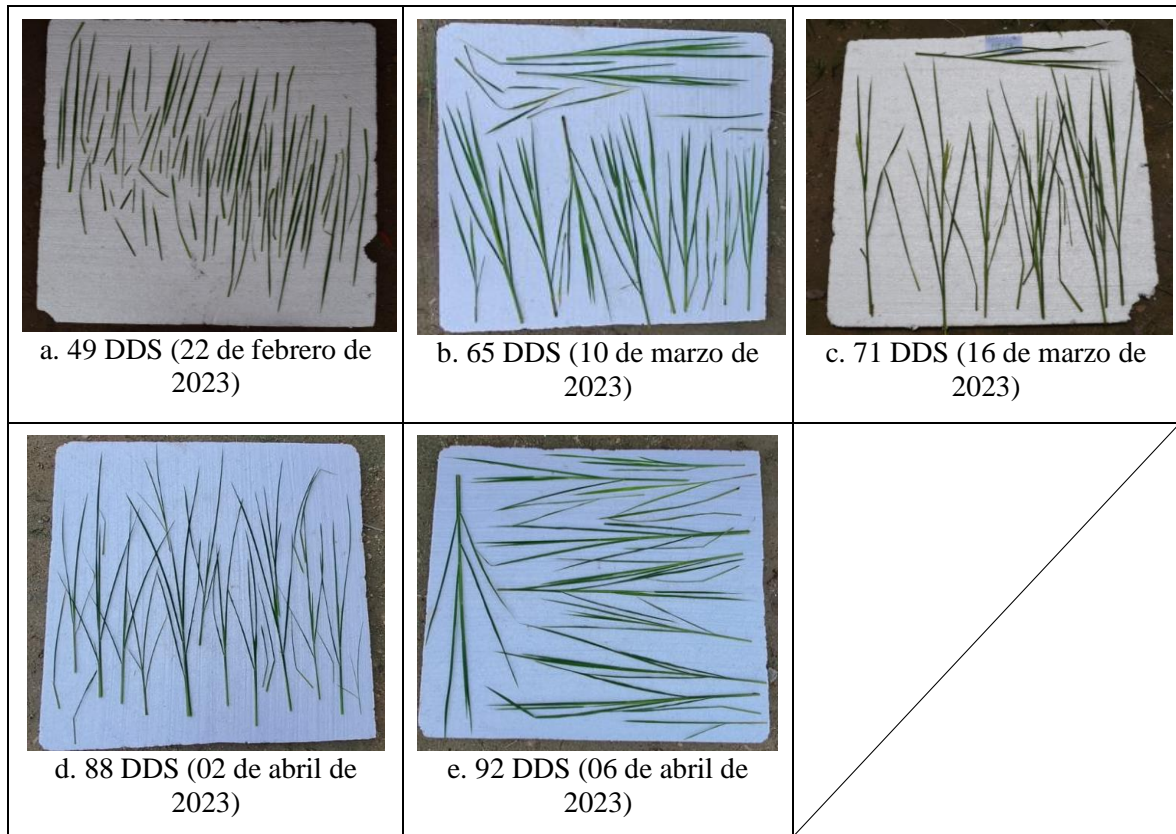
### **3.3. Procedimiento**

#### **3.3.1. Índice de área foliar (IAF) por método extractivo**

Se identificaron un total de 25 plantas, ubicadas en áreas cercanas al campo de inundación continua. En cada una de estas plantas se llevaron a cabo mediciones específicas relacionadas con el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y extracción de biomasa para el Índice de Área Foliar (IAF) del cultivo para obtener una ecuación de correlación.

Para medir el NDVI, se utilizó un reflectómetro portátil GreenSeeker™, de la marca Trimble. Se realizaron tres mediciones en cada planta a una distancia de 60 cm por encima de las mismas. Durante el crecimiento del cultivo, se recopilaron un total de 75 lecturas. El enfoque empleado para registrar las mediciones del NDVI fue similar al usado por Fan *et al.* 2009.

Se empleó el método extractivo para determinar el IAF, que consistió en extraer la zona aérea de la planta para separar hoja por hoja y colocar en un poliestireno expandido de 1 x 1 m, así como se verifica en la Figura 5. Estas hojas se clasificaron de acuerdo a su tamaño y se tomaron fotografías para determinar el área foliar en el software de ArcGIS 10.4. Por último, el área foliar se dividió con el área de referencia que es la distancia entre planta y plantas (20 x 20 cm), como se muestra en la Ecuación 21. Este procedimiento se llevó a cabo en las 25 plantas empleadas en la medición del NDVI, y con cuatro repeticiones para cada una.



**Figura 5: Muestras de hojas de arroz extraídas para estimación del IAF en campo INIA – Vista Florida**

$$IAF = \frac{\text{área foliar}}{\text{área de referencia}} \dots \dots (21)$$

Para hallar el IAF se usó la ecuación obtenida de la relación entre IAF y NDVI (información recolectada en campo). Dicha ecuación obtenida se ingresó al NDVI generado por las imágenes del UAV (Ecuación (22) y de esta manera se encontró el IAF espacial.

Con la información de las imágenes multiespectrales, se estimó el NDVI. El cálculo se realizó a partir de las reflectancias de las bandas NIR y RED de las imágenes multiespectrales y basándose en la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \dots \dots (22)$$

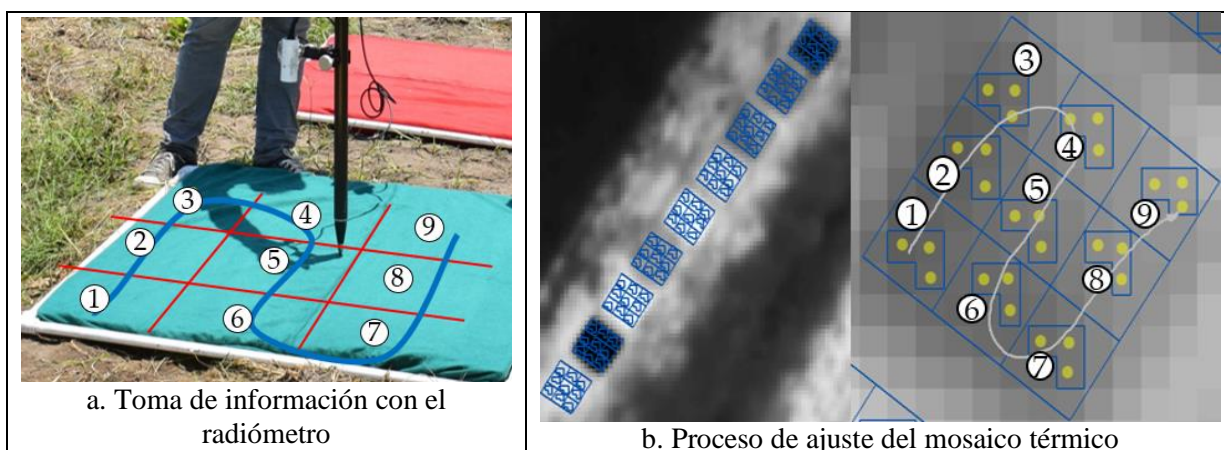
### 3.3.2. Componentes del balance de energía para riego inundado (CF) y riego AWD

#### a. Obtención de ortomosaico

Las imágenes se procesaron utilizando la versión 4.4.12 del software de fotogrametría Pix4Dmapper Pro, desarrollado por Pix4D S.A., con sede en Prilly, Suiza. Se realiza principalmente en tres procedimientos estándares: (i) alineación de imágenes geolocalizadas, (ii) generación de nubes de puntos y corrección geométrica, y (iii) creación del modelo digital de la superficie (MDS) y ortomosaico utilizando la ponderación inversa de la distancia (Río *et al.*, 2019). El programa proporciona plantillas para la creación de mosaicos a partir de imágenes RGB, multispectrales, térmicas y modelos en 3D. También incluye un registro de modelos de cámaras que identifica los formatos de las imágenes tomadas, lo que permite que estas imágenes sean procesadas. En el Anexo 3 se muestran imágenes procesadas de RGB de los campos experimentales de INIA - Vista Florida.

#### b. Ajuste del ortomosaico de térmico

Las imágenes térmicas se ajustaron con data de un radiómetro Apogee MI-210 (Apogee Instruments, MI-210, Utah, EE. UU.) (Figura 6a). Se realizó este proceso sobre nueve tipos de superficies conocidas: aluminio, hojas verdes, hojas secas, poliestireno expandido, tela amarilla, tela negra, tela verde, tela roja y suelo desnudo. Estas estaban contenidas en un marco cuadrado de PVC de un metro de largo y ancho. Las mediciones fueron tomadas desde una altura de 40 cm, recopilándose un total de 81 lecturas en cada vuelo (entre el 11 de febrero y el 2 de junio de 2023). La Figura 6b, señala el ajuste de los mosaicos térmicos obtenidos del UAV.



**Figura 6: Toma de temperatura**

Nota: en cada cobertura (a), y en el ráster por grupos de píxeles (b)

La data del radiómetro permitió corregir los datos de la imagen térmica a un valor más real, debido a que la imagen es sensible a la humedad del ambiente que podría alterar los datos registrados por la cámara térmica.

### **c. Datos meteorológicos**

**c.1.** La recopilación de información meteorológica se extrajo de la estación meteorológica portátil Atmos-41, la cual posee capacidades de comunicación digital SDI-12 para transmitir datos desde sensores ambientales y, además, la estación estaba conectada a un data logger modelo ZL6. La información meteorológica fue: la temperatura del aire ( $T$ , °C), humedad relativa (RH, %), velocidad del viento (WS,  $m s^{-1}$ ) y radiación solar (SR,  $W m^{-2}$ ).

Dicha estación portátil se instaló al centro de la zona de estudio, a una altura de dos metros, con el fin de obtener información meteorológica del cultivo durante los días de vuelo (13 fechas), a largo de su fase fenológica. El tiempo de duración de la colecta para todos los días de vuelo fue de una a dos horas, intervalo de tiempo en que se realizaban las tomas de datos en campo y el vuelo del UAV, de esta manera obtener la velocidad de viento en tiempo y lugar correspondiente. No pudiendo dejar en campo más tiempo, por evitar alguna sustracción del equipo tan costoso.

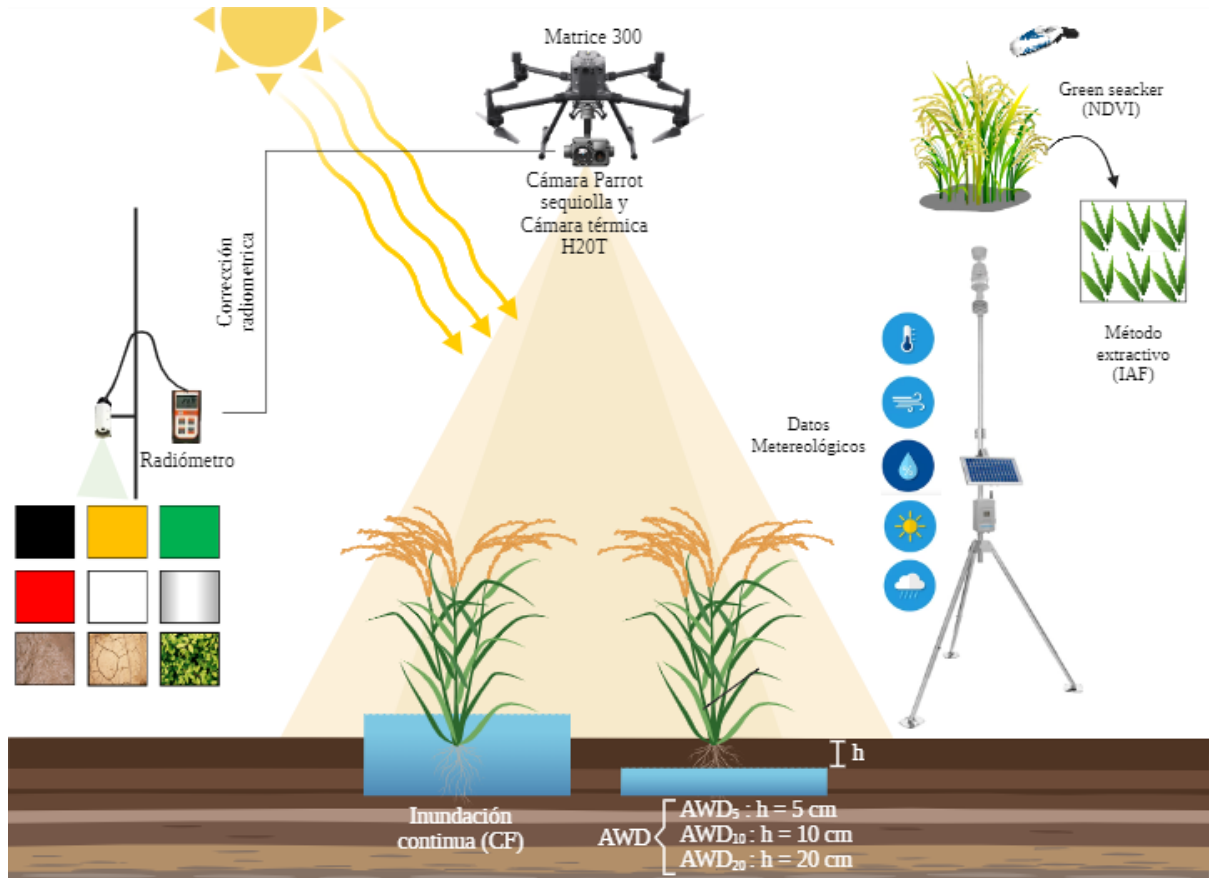
El equipo de Investigación "Teledetección y cambio climático aplicado a la agricultura y Recursos Hídricos" proporcionó formación y capacitación para la instalación de la estación portátil en el campo de arroz. Además, se facilitaron dos videos (recursos audiovisuales) que detallan el proceso de ensamblaje de la estación:

<https://youtu.be/iMhnr5RGoWQ?si=9zjo85WpbZ1hDQG1>

<https://youtu.be/K5PP9UeZO38?si=Ix8xwtRvDpuYN7zG>

**c.2.** Para estimar la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ), se requirió de la data meteorológica durante las 24 horas de cada uno de los días de vuelo (ANEXO 4). Por ello mismo, se dejó la estación portátil las 24 horas (captando datos cada 5 minutos) durante tres días completos de las fechas de vuelo (11 de febrero, 11 y 31 de mayo). Así como también fue necesario de la data de AGPRES (estación meteorológica de INIA – Vista florida) de los mismos días de vuelo con información de 24 horas de la estación portátil.

La Figura 7 representa el resumen gráfico de la obtención de datos en campo con los equipos utilizados en el área de estudio. Además, se visualiza el procedimiento metodológico de toma de información que se realizaron en campo terrestre y aéreo (UAV).



**Figura 7: Resumen gráfico con las técnicas de riego empleadas**

Nota: Inundación continua (CF) y alternancia de humedecimiento y secado (AWD), esta última con niveles de agua a 5 cm, 10 cm y 20 cm, respecto al nivel de la superficie del suelo (AWD<sub>5</sub>, AWD<sub>10</sub> y AWD<sub>20</sub>)

#### d. Radiación neta (R<sub>n</sub>)

El primer componente a calcular es la radiación neta (R<sub>n</sub>), se ingresó información de: T<sub>s</sub> (en kelvin), banda NIR, banda RED, IAF, DTM (modelo digital de elevación), G<sub>sc</sub> (constante solar atmosférico), cos(θ) (es el coseno de la incidencia solar) y dr (es la distancia relativa entre la tierra y el sol); ANEXO 5. Después de dicho procedimiento se obtendrá el ráster de la radiación neta. La Figura 8 incluye el proceso del cálculo de la radiación neta.

**e. Calor sensible del aire (H)**

H se calcula ingresando la información de: DTM, IAF, TS (en kelvin),  $U_{200}$ , k (constante que será de 0,41), " $z_1$  y  $z_2$ ",  $C_p$  y las constantes "a y b" (Figura 8) que fueron obtenidos empíricamente para cada imagen, donde:

El procedimiento utilizado consistió en elegir un grupo de píxeles fríos y calientes, estableciendo condiciones límites para alcanzar un equilibrio energético. Fueron seleccionados en base a la similitud entre sus píxeles vecinos y la distancia a la estación meteorológica. Para identificar el píxel frío, se enfocó en áreas agrícolas y se eligió un subconjunto de píxeles cuyos valores de temperatura estuvieran dentro del rango de  $\pm 0,2$  K del promedio del 20% más frío. Estos píxeles fueron extraídos del área que representaba el 5% de los valores más altos del NDVI. Finalmente, se obtuvo el promedio de los valores más altos del NDVI, que representaba el 2% del 5% inicialmente seleccionado, como el píxel candidato final. Por otro lado, para identificar el píxel caliente, se enfocó en suelos agrícolas desnudos sin vegetación y se eligió un subconjunto de píxeles cuyos valores de temperatura estuvieran dentro del rango de  $\pm 0,2$  K del promedio del 20% más caliente. Estos píxeles fueron extraídos del área que representaba el 10% de los valores más bajos del NDVI. La selección de los píxeles finales se basó en la cercanía del valor promedio y la similitud entre los píxeles próximos.

**f. Flujo del calor del suelo (G)**

La Figura 8 indica el proceso secuencial para obtener G, donde se muestra que para calcular el G se requirió de la información procesada de la obtención del  $R_n$ , el albedo, así como también de la  $T_s$  (kelvin) y NDVI.

**g. Flujo de calor latente (LE)**

Se determinó LE, restando el flujo de calor del suelo (G) y el flujo de calor sensible (H) de la radiación neta ( $R_n$ ). Esto se verifica en la Figura 8, donde se representa el proceso secuencial para obtener los componentes de la  $ET_c$ .

### 3.3.3. Evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) para riego inundado (CF) y riego AWD

#### a. Por balance de energía

La ecuación 23 del modelo METRIC estableció la evapotranspiración diaria, proporcionando una estimación de la evapotranspiración instantánea ( $ET_{inst}$ ).

$$ET_{inst} = 3600 * \frac{LE}{\lambda} \dots \dots (23)$$

Dónde:  $ET_{inst}$  es la ET instantánea ( $mm \cdot h^{-1}$ ); 3600 es el tiempo de conversión de segundos a horas y ( $\lambda$ ) es el calor latente de vaporización o el calor absorbido cuando un kilogramo de agua se evapora ( $J \cdot kg^{-1}$ ) (Allen *et al.*, 2007).

La fracción de ET de referencia ( $ET_rF$ ) se estima de la relación existente entre la ET instantánea ( $ET_{inst}$ ) de cada píxel y la ET de referencia ( $ET_0$ ), Ecuación 24.

$$ET_rF = \frac{ET_{inst}}{ET_0} \dots \dots (24)$$

Durante el cálculo de la  $ET_rF$  se utiliza un único valor de  $ET_0$  para todos los píxeles, dicho valor se encuentra en los datos de la estación meteorológica, sin embargo, para la  $ET_{inst}$  cada píxel tiene un valor único (Allen *et al.*, 2007).

Para el modelo METRIC, la  $ET_{24}$  ( $mm \cdot d^{-1}$ ) se calcula considerando que la  $ET_rF$  instantánea es igual para un promedio de 24 horas (Allen *et al.*, 2007), Ecuación 25.

$$ET_{24} = ET_rF * ET_{0_{24}} \dots \dots (25)$$

Donde:  $ET_rF$  representa la proporción de la ET de referencia.  $ET_{0_{24}}$  se calcula sumando los valores horarios de  $ET_0$  para cada día que se toma la imagen.

La  $ET_0$  se halló con la información obtenida de la estación meteorológica portátil ATMOS 41, donde se descargó data de la temperatura media ( $T^\circ C$ ), humedad relativa (HR), velocidad del viento (V), presión atmosférica (P) y radiación solar. Luego se preparó un Excel con los datos meteorológicos ya mencionados y se calculó la  $ET_0$  por cada hora (las 24 horas del



día), aplicando el método de Penman-Monteith.

A partir de lo obtenido de  $ET_0$ , se calculó la  $ET_{0_{24}}$ , mediante la sumatoria de  $ET_0$  de las 24 horas comprendidas en un día (Ecuación 26).

$$ET_{0_{24}} = ET_{0_1} + ET_{0_2} + ET_{0_3} + \dots + ET_{0_{22}} + ET_{0_{23}} + ET_{0_{24}} \dots \dots (26)$$

Los resultados obtenidos de la  $ET_0$  y  $ET_{0_{24}}$  se verifican en el ANEXO 6.

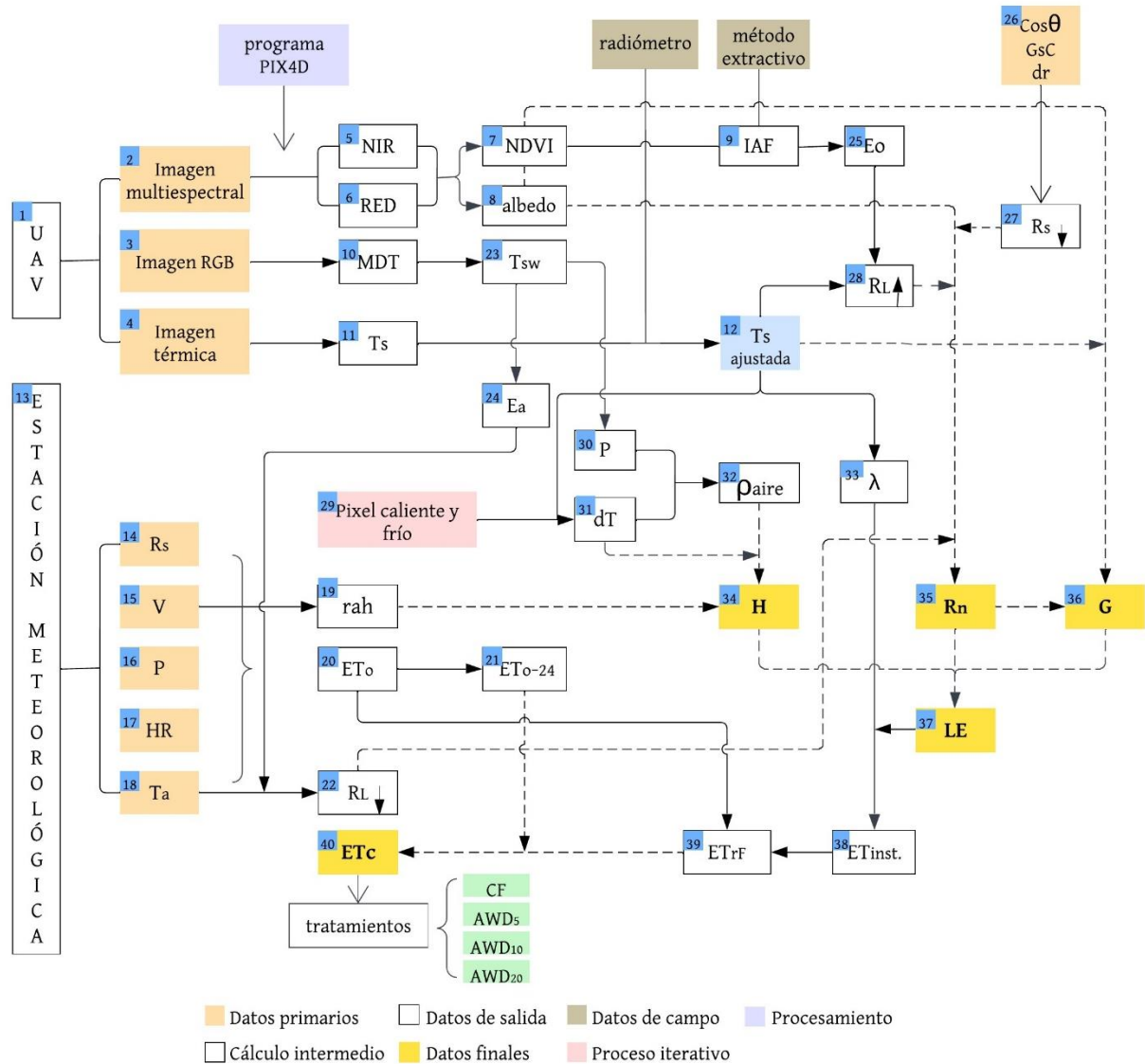
La Figura 8 muestra el proceso paso a paso y numerada para la estimación de la  $ET_c$  por balance energético (modelo METRIC), a partir de la adquisición de las imágenes hasta la obtención de los resultados ( $ET_c$  y sus componentes). El software que se empleó fue el ArcGIS 10.4 (*ModelBuilder*):

Se realizaron los vuelos con el UAV (1) para coleccionar imágenes multispectrales (2), RGB (3) y térmicas (4). De las bandas NIR (5) y RED (6), se obtuvieron los albedos ( $\alpha$ ) (5), e índices de vegetación como el NDVI (7) e IAF (9), anticipadamente ajustados con información de campo. Se tuvo el MDT (10) del ortomosaico RGB (3).

Se coleccionó data climática (13) como la radiación solar ( $R_s$ ) (14), velocidad del viento ( $V$ ) (15), temperatura del aire ( $T_a$ ) (18), para calcular la  $ET_0$  (20) y la resistencia aerodinámica ( $r_{ah}$ ) (19). Además, se halló radiación de onda larga incidente ( $R_{L\downarrow}$ ) (22) de la  $T_a$  (18). Con datos de  $ET_0$  (20) se obtuvo  $ET_{0_{24}}$  (21). Con la imagen térmica (4) se obtuvo la temperatura superficial ( $T_s$ ) (11). Luego, con la información de campo (radiómetro) se ajustó la  $T_s$  para estimar la  $T_s$  ajustada (12). Del MDT se calculó la transmisividad atmosférica ( $T_{sw}$ ) (23) para estimar la presión atmosférica ( $P$ ) (30).

De la identificación de valores umbrales llamados pixel frío y caliente (20) se determinó el diferencial de temperatura ( $dT$ ) (31), con  $P$  se halló la densidad del aire ( $\rho_{air}$ ) (32). La emisividad térmica de la superficie ( $E_o$ ) (25) se calculó del IAF (9), y con la  $T_s$  ajustada se halló la radiación de onda larga saliente ( $R_{L\uparrow}$ ) (28). Se determinó la radiación de onda corta entrante ( $R_{s\downarrow}$ ) (27) a partir del  $\cos\theta$ ,  $G_{sC}$  y  $d_r$  (26). De la  $T_s$  ajustada se encontró la  $\lambda$  (33) y, de esta última se halló la evapotranspiración instantánea ( $ET_{inst}$ ) (38).

Se obtuvieron los componentes del balance energético como la radiación neta (Rn) (35), el flujo de calor del suelo (G)(36), el flujo de calor sensible del aire (H)(34) y el flujo de calor latente (LE) (37). En última instancia, se estimó la fracción de evapotranspiración de referencia (ET<sub>rF</sub>) (39) y la ET<sub>c</sub> (40) con lo obtenido de la ET<sub>0,24</sub> (21).



$\cos\theta$ : coseno de la incidencia solar

dr: distancia relativa entre la tierra y sol

dT: diferencia de temperatura

Ea: emisividad atmosférica

Eo: emisividad térmica

ET<sub>inst.</sub>: evapotranspiración instantánea

ET<sub>0</sub>: evapotranspiración de referencia

ET<sub>0-24</sub>: evapotranspiración de referencia de 24 horas

ET<sub>rF</sub>: fracción de evapotranspiración de referencia

GSc: constante solar atmosférica

NIR & RED: bandas

P: presión atmosférica

rah: resistencia aerodinámica

$R_{L\uparrow}$ : radiación de onda larga saliente

$R_{L\downarrow}$ : radiación de onda larga entrante

$R_s\downarrow$ : radiación de onda corta entrante

Ts: temperatura superficial

Tsw: transmitividad atmosférica

$\lambda$ : landa

$\rho_{\text{aire}}$ : densidad del aire

**Figura 8: Secuencia del diagrama de flujo para estimar de la ET<sub>c</sub> por METRIC**

Se dividió cada parcela en 3 x 6, resultando 18 cuadrantes por cada tratamiento (CF, AWD<sub>5</sub>, AWD<sub>10</sub> y AWD<sub>20</sub>), para realizar análisis y pruebas estadísticas de los valores obtenidos del ET<sub>c</sub>. Primero, se examinó la normalidad de la variable "ET<sub>c</sub>" mediante la prueba de Shapiro-Wilk, resultando un valor p extremadamente bajo ( $p = 7,857e^{-06}$ ), indicando que los datos no siguen una distribución normal ( $p < 0,05$ ; se rechaza la hipótesis nula). Además, se hizo una prueba de homogeneidad de varianzas de Levene, revelando diferencias significativas entre los grupos ( $p = 1,781e^{-07}$ ) lo que reveló que en los valores no hay normalidad y tampoco homogeneidad de varianzas. Por tal motivo, se optó por realizar el test de Kruskal-Wallis lo que confirmó que existe diferencias significativas entre los grupos ( $p = 9,027e^{-06}$ ). Posteriormente, se llevó a cabo la prueba de Dunn para comparaciones múltiples, revelando diferencias significativas en varias comparaciones, especialmente entre el tratamiento CF y los demás (AWD<sub>5</sub>, AWD<sub>10</sub> y AWD<sub>20</sub>).

#### **b. Por balance hídrico**

Con el modelo AquaCrop, previamente parametrizado, se estimó la evapotranspiración del cultivo por balance hídrico. El modelo AquaCrop fue creado por la organización para la agricultura y la alimentación (FAO) (Elsadesk, 2023). El modelo AquaCrop ha sido calibrado y evaluado para simular el desarrollo y el rendimiento del arroz en condiciones de inundación en algunas zonas del mundo (Abdul *et al.*, 2018; Lin *et al.*, 2012; Porras *et al.*, 2020). Los datos para el modelo AquaCrop se dividen en cuatro módulos: clima, cultivo, riego y suelo (Nie *et al.*, 2022).

Los datos meteorológicos necesarios (T<sub>máx</sub>, T<sub>min</sub>, V, HR, hr de sol, P, Rad) para ejecutar el módulo climático en AquaCrop fueron extraídos de cada uno de los días durante todas las fases de fenología del arroz, de la estación meteorológica portátil ATMOS 41, así como también de la estación Lambayeque y AGPRES. Los archivos climáticos se cargaron en AquaCrop para calcular la Evapotranspiración (ET<sub>0</sub>) utilizando la ecuación de Penman-Monteith, que considera todos los parámetros relacionados con el intercambio de energía y el flujo de calor latente del suelo (Raes, 2017). La información climática, información fenológica de campo, rendimientos, la profundidad de raíz, características del suelo, manejo del agua y la variación temporal del dosel en cada tratamiento, permitieron parametrizar el modelo de balance de agua por AquaCrop.

### **c. Experiencia en La Molina**

A fin de encontrar otra relación entre  $ET_c$  por balance de energía y  $ET_c$  balance hídrico, se instalaron y monitorearon pozas de arroz en La Molina:

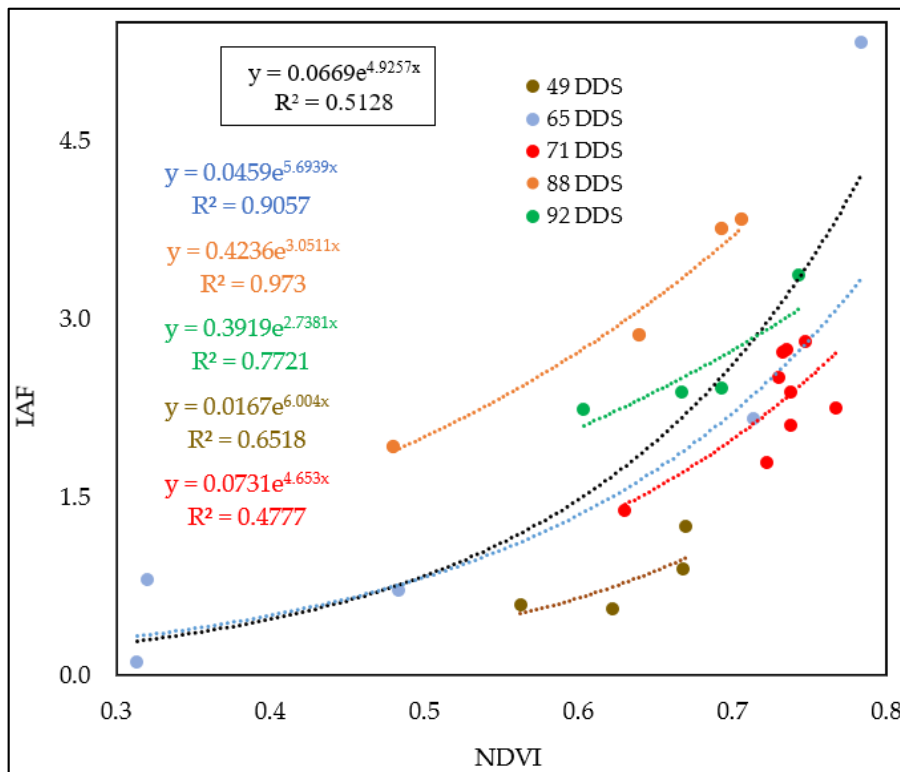
En el área experimental de riego (AER) de la Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM) se instalaron tres pozas de arroz de 3 x 4 m con la misma variedad del cultivo, INIA 515 – Capoteña. Incluso, fue preparada con las mismas condiciones mediante almácigos que se trasplantaron a una distancia de 0,25 x 0,25 m, durante el verano del 2023. Sin embargo, el régimen hídrico mantuvo la humedad del terreno entre saturación y una lámina de agua máxima de 5 cm con sensores de humedad FDR (Frequency Domain Reflectometry). En cuanto al agua de riego; provino del río Rímac y fue almacenada en un tanque de 25 m<sup>3</sup>, conectada a una red de tuberías para llevar agua a cada poza.

Se ubicaron tres puntos de control para la georreferenciación de la cámara térmica y se realizaron siete vuelos con el UAV Matrice 300, durante el desarrollo del cultivo. De igual manera, se acopló la cámara multiespectral y la cámara térmica H20T al UAV Matrice 300. También se disponía de una estación meteorológica, Davis Vantage Pro, la cual estuvo ubicada en el centro de las pozas. Se procesaron las imágenes térmicas y multiespectrales según el procedimiento descrito para el estudio de Chiclayo. Se obtuvieron los valores del  $ET_c$  por balance de energía y, además, se hallaron los valores del  $ET_c$  por balance hídrico con el AcuaCrop para La Molina.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

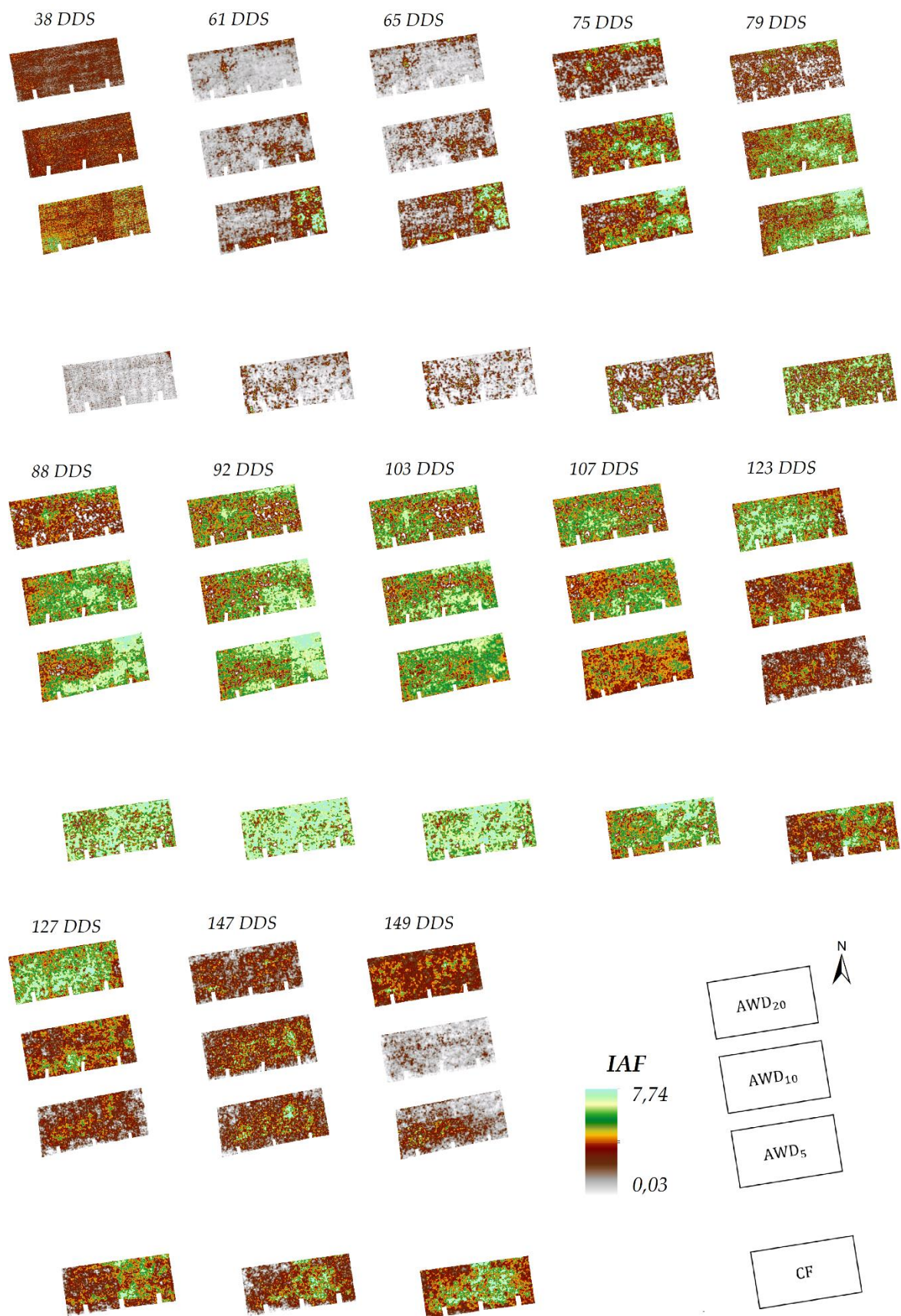
### 4.1. Índice de área foliar (IAF) por método extractivo

Se desarrolló la conexión entre el IAF estimado por método extractivo y NDVI medido en campo por diferentes fechas de desarrollo del cultivo, con el fin de obtener la variación espacial del IAF. Se generaron cinco ecuaciones de correlación de las fechas coincidentes de toma de información. Posteriormente, con los datos de las cinco fechas, se generó la ecuación exponencial de  $Y_{IAF} = 0,0669e^{4,9257*NDVI}$  con coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,5128 (Figura 9).



**Figura 9: Relación entre NDVI medido con GreenSeeker e IAF estimado por método extractivo de cinco fechas, realizados en campo**

Nota: El color de la ecuación coincide con el color de los puntos y línea de tendencia. La ecuación en negro corresponde a la ecuación general que son todos los puntos de las cinco fechas.



**Figura 10: Variación espacial del IAF en fase vegetativa (38 a 92 DDS), fase reproductiva (103 a 127 DDS) y fase de maduración (147 y 149 DDS) del cultivo de arroz**

Se obtienen valores hasta de 7,74 del IAF que coinciden con lo mencionado por Ali *et al.* (2021) de 1,83 a 7,26, Gong *et al.* (2021) de 2,9 a 9,8 y Serrano *et al.* (2023) de 3,48 a 9,94 en cultivos de arroz.

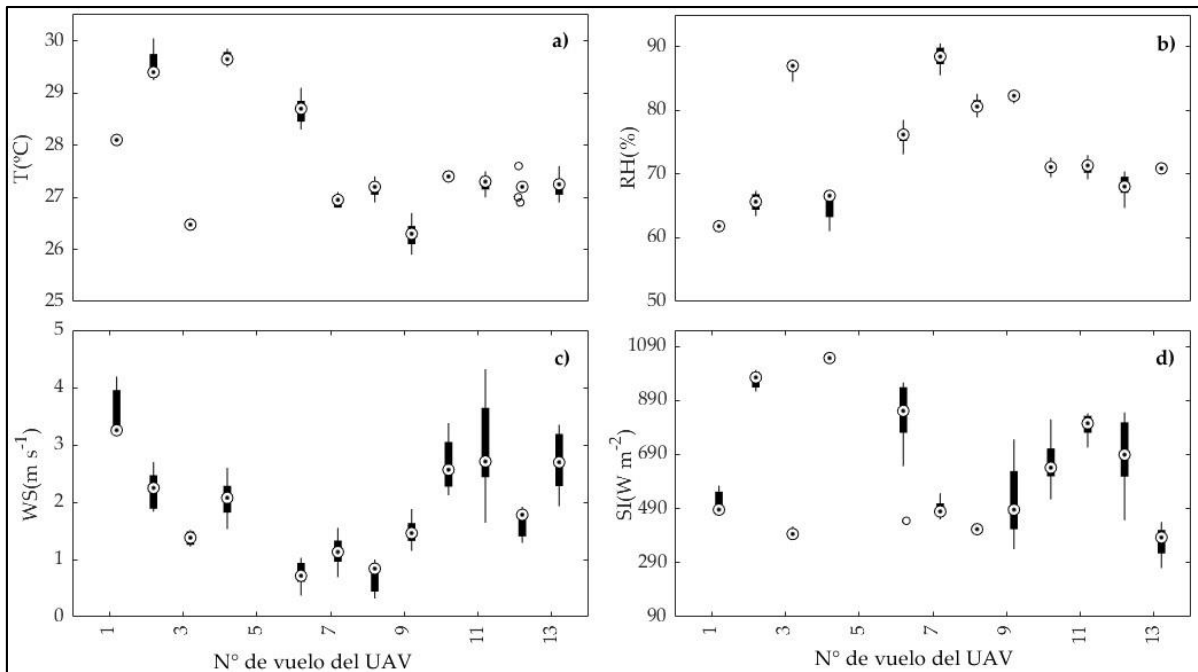
El IAF llega a su punto más alto durante la fase reproductiva y disminuye a medida que la planta envejece. Esto muestra cambios importantes en el área de las hojas en relación con las distintas etapas del proceso de crecimiento y desarrollo de la vegetación. El uso de una cantidad elevada de Nitrógeno produce plantas más altas, con un mayor número de brotes y un área foliar más amplia (Pan *et al.*, 2011).

Además, la reflectancia hiperespectral del dosel no solo se ve influenciada por las características biofísicas, la estructura del dosel, la absorción y dispersión atmosférica, sino también por la dirección de la radiación incidente y las condiciones del suelo (Carvalho *et al.*, 2016).

#### **4.2. Componentes del balance de energía para riego inundado (CF) y riego AWD**

Se empleó una estación portátil de meteorología para obtener datos meteorológicos confiables y representativos en el estudio. Según Chu *et al.* (2017), es crucial contar con mediciones precisas de las condiciones ambientales para el cálculo de la ET. Pues mayormente en los estudios se obtienen datos de estaciones meteorológicas que están lejos del lugar de estudio.

La Figura 11 muestra las condiciones meteorológicas de los días de vuelo. La temperatura ambiental (Figura 11a) fluctuó de 25,4 a 30,5°C. La humedad relativa (Figura 11b) fue muy variable (61,05 – 90,5%). La velocidad del viento (Figura 11c) varió entre 0,32 m s<sup>-1</sup> a 4,32 m s<sup>-1</sup>. La radiación solar (Figura 11d) varió de 266,5 – 1051 W m<sup>-2</sup>. Estos datos fueron tomados durante el intervalo de tiempo en que se ejecutaba el vuelo del UAV, específicamente entre las 09:00 y las 11:30 am.



**Figura 11: Condiciones meteorológicas según N° de vuelo realizado con el UAV de acuerdo al DDS**

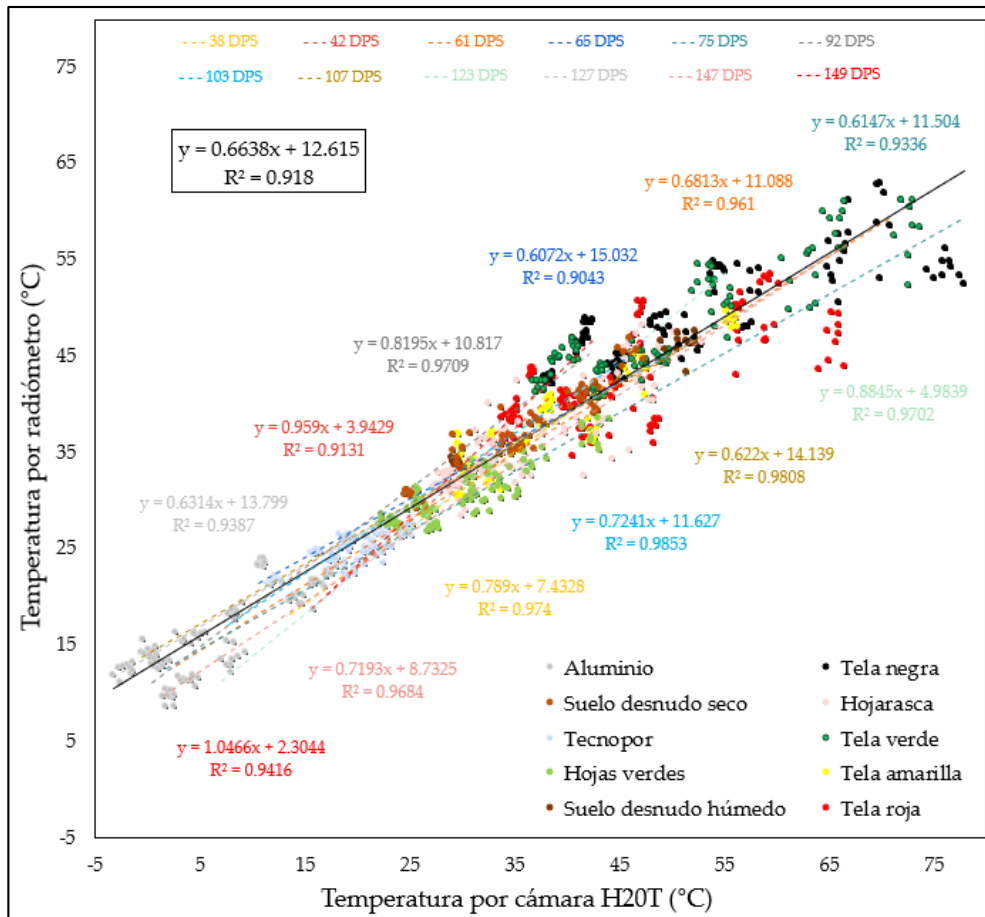
Nota: (a) temperatura (T, °C), (b) humedad relativa (RH, %), (c) velocidad del viento (WS, m s<sup>-1</sup>) y (d) radiación solar (SI, W m<sup>-2</sup>)

#### 4.2.1. Radiación neta (Rn)

##### a. Ajuste del ortomosaico térmico

La Figura 12 representa la calibración de los ortomosaicos de imágenes térmicas que consistió en correlacionar datos obtenidos de imágenes del UAV con la cámara H20T y lo medido en campo con el radiómetro de temperatura. Se generaron todas las ecuaciones de corrección por cada día de vuelo (Figura 12) para finalmente obtener la ecuación general ( $Y_{radiometro} = 0,6638 X_{H20T} + 12,615$ ), cuyo R<sup>2</sup> fue de 0,918 y error cuadrático medio (RMSE) de 12,77°C.





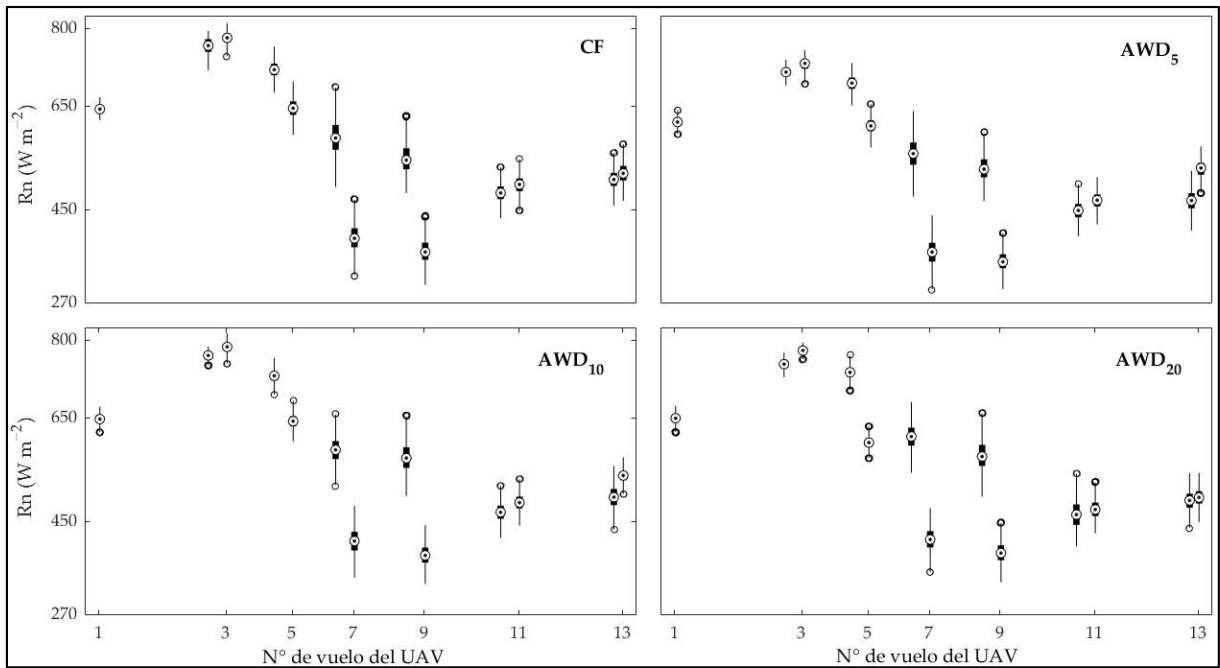
**Figura 12: Correlación entre las temperaturas captadas por el radiómetro Apogee MI-210 y la cámara térmica H20T**

Nota: El color de la ecuación coincide con el color de los puntos y línea de tendencia. La ecuación en negro corresponde a la ecuación general del total de datos obtenidos en campo durante los días de vuelo.

En el Anexo 7, se visualiza las imágenes térmicas corregidas, luego de ingresar la ecuación a los ortomosaicos térmicos obtenidos por el UAV.

### b. Diagrama de cajas de la radiación neta (Rn)

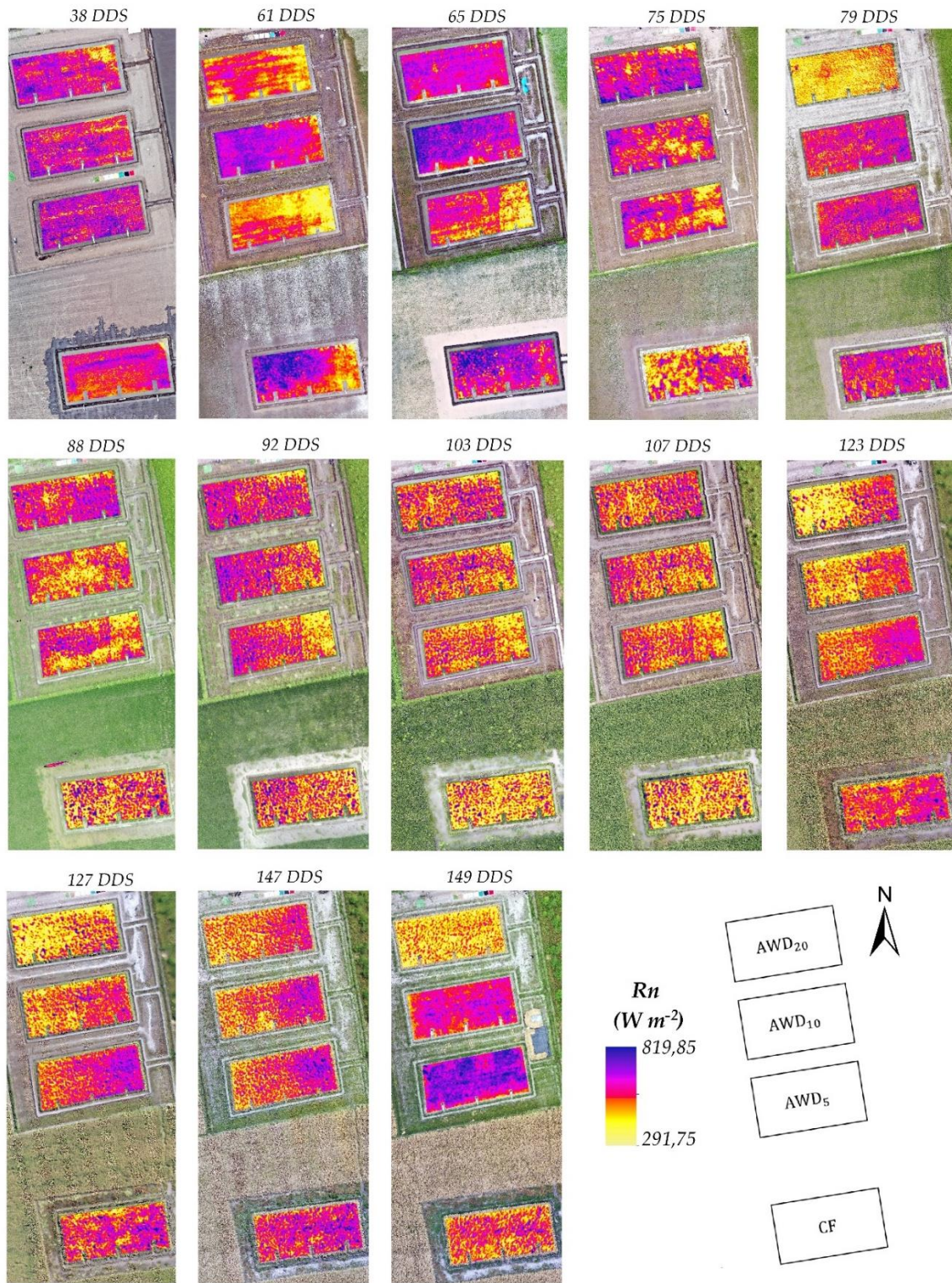
A partir de las informaciones obtenidas y procesadas se obtiene los valores de la radiación neta para cada tratamiento, y de las 13 fechas de monitoreo con el UAV. La Figura 13 presenta el diagrama de cajas de Rn, donde se pueden observar estos valores.



**Figura 13: Diagrama de cajas de Rn para los tratamientos CF y AWD, durante los días de vuelo del UAV**

La Figura 13 contiene el resultado obtenido de Rn estimados por el modelo METRIC, obteniéndose valores mínimos a máximos para cada manejo de riego: CF de 291,75 a 621,09  $W m^{-2}$ , AWD<sub>5</sub> de 311,68 a 795,99  $W m^{-2}$ , AWD<sub>10</sub> de 318,16 a 816,57  $W m^{-2}$  y AWD<sub>20</sub> de 310,27 a 819,85  $W m^{-2}$ . Así mismo, en la Figura 14 se representa la variación espacial de los valores obtenidos para el componente de radiación neta.

Estos resultados coinciden con el rango (100 a 800  $W m^{-2}$ ) obtenido por Nassar *et al.* (2021) y Montibeller *et al.* (2017). Sin embargo, el 75 DDS señala un Rn de 819.85  $W m^{-2}$  para el tratamiento AWD<sub>20</sub> esto debido a que ese día se señala una mayor temperatura del ambiente y fue uno de los días de seca. Asimismo, algunos días de monitoreo también se registró un rango mayor, posiblemente a diferencias en la distribución espacial del albedo y las condiciones climáticas, según lo señalado por Montibeller *et al.* (2017).



**Figura 14: Variación espacial de  $R_n$  en fase vegetativa (38 a 92 DDS), fase reproductiva (103 a 127 DDS) y fase de maduración (147 y 149 DDS) del cultivo de arroz**

#### **4.2.2. Calor sensible del aire (H)**

##### **a. Píxeles fríos y píxeles calientes**

La selección de los píxeles fríos y calientes de cada fecha de vuelo (Tabla 9), fueron obtenidos acorde al modelo METRIC con porcentajes de píxeles de temperatura y NDVI, así como fue detallado en el procedimiento. Este procedimiento es propio del modelo empleado a diferencia del modelo SEBAL que no establece porcentajes límites de selección de píxeles.

De la Tabla 9, los píxeles fríos corresponden a la temperatura superficial ( $T_s$ ) mínima de 296,76 K, y a valores máximos para NDVI, IAF y albedo de 0,93, 6,83 y 0,35, respectivamente. Así como también, los píxeles calientes corresponden a una temperatura superficial ( $T_s$ ) máxima de 321,88 K, con valores mínimos en NDVI, IAF y albedo de 0,02, 0,05 y 0,15, respectivamente.

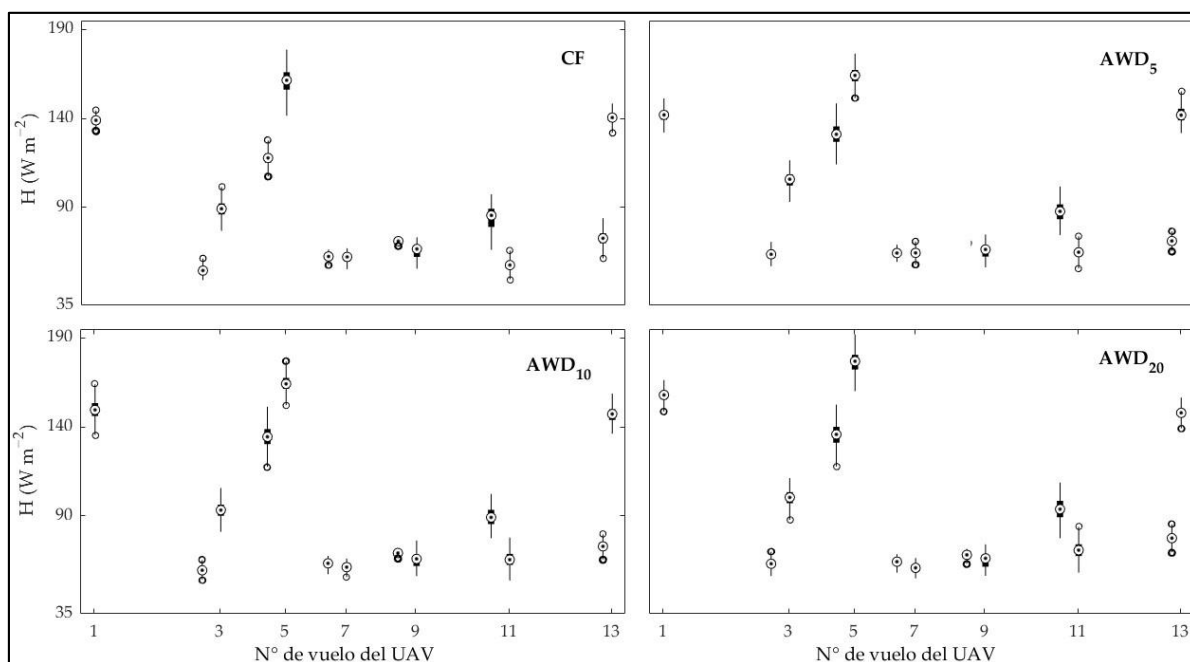
**Tabla 9: Selección del píxel frío y caliente con los valores de NDVI, albedo, temperatura y las constantes de calibración  $dT = a + b T_s$**

| Fecha   | DDS | Píxel    | Coordenada (WGS84, UTM) |            | NDVI | IAF  | Albedo | T(K)   | Constantes de calibración |          |
|---------|-----|----------|-------------------------|------------|------|------|--------|--------|---------------------------|----------|
|         |     |          | X                       | Y          |      |      |        |        | a                         | b        |
| 11-feb. | 38  | frío     | 633648,78               | 9255632,41 | 0,72 | 2,78 | 0,25   | 298,96 | 0,382                     | -111,531 |
|         |     | caliente | 633637,75               | 9255631,10 | 0,02 | 0,05 | 0,22   | 307,51 |                           |          |
| 6-mar.  | 61  | frío     | 633644,81               | 9255650,83 | 0,77 | 3,68 | 0,22   | 302,40 | 0,345                     | -100,349 |
|         |     | caliente | 633632,07               | 9255701,91 | 0,15 | 0,11 | 0,15   | 311,10 |                           |          |
| 10-mar. | 65  | frío     | 633613,16               | 9255672,40 | 0,84 | 5,43 | 0,21   | 301,26 | 0,636                     | -187,402 |
|         |     | caliente | 633606,73               | 9255734,94 | 0,14 | 0,10 | 0,15   | 306,29 |                           |          |
| 20-mar. | 75  | frío     | 633629,01               | 9255674,63 | 0,85 | 5,88 | 0,27   | 302,12 | 0,245                     | -71,220  |
|         |     | caliente | 633635,03               | 9255702,95 | 0,14 | 0,10 | 0,26   | 318,34 |                           |          |
| 24-mar. | 79  | frío     | 633619,50               | 9255642,26 | 0,88 | 6,13 | 0,29   | 300,35 | 0,166                     | -46,459  |
|         |     | caliente | 633634,97               | 9255708,46 | 0,16 | 0,68 | 0,22   | 321,88 |                           |          |
| 2-abr.  | 88  | frío     | 633620,37               | 9255642,46 | 0,90 | 6,63 | 0,33   | 300,60 | 0,322                     | -92,839  |
|         |     | caliente | 633634,20               | 9255704,54 | 0,24 | 0,88 | 0,20   | 308,65 |                           |          |
| 6-abr.  | 92  | frío     | 633626,61               | 9255689,27 | 0,93 | 6,17 | 0,35   | 299,17 | 0,340                     | -99,414  |
|         |     | caliente | 633595,26               | 9255717,95 | 0,22 | 0,88 | 0,17   | 308,14 |                           |          |
| 17-abr. | 103 | frío     | 633622,01               | 9255705,07 | 0,91 | 7,73 | 0,32   | 300,48 | 0,152                     | -41,320  |
|         |     | caliente | 633595,07               | 9255719,49 | 0,24 | 0,22 | 0,17   | 311,56 |                           |          |
| 21-abr. | 107 | frío     | 633604,20               | 9255713,17 | 0,91 | 7,61 | 0,32   | 296,76 | 0,271                     | -77,976  |
|         |     | caliente | 633616,79               | 9255726,50 | 0,26 | 0,25 | 0,15   | 308,15 |                           |          |
| 7-may.  | 123 | frío     | 633643,04               | 9255650,77 | 0,86 | 6,99 | 0,30   | 297,11 | 0,185                     | -53,158  |
|         |     | caliente | 633595,89               | 9255711,76 | 0,20 | 0,18 | 0,20   | 317,35 |                           |          |
| 11-may. | 127 | frío     | 633625,31               | 9255645,13 | 0,84 | 6,42 | 0,29   | 300,27 | 0,323                     | -95,512  |
|         |     | caliente | 633616,16               | 9255723,40 | 0,22 | 0,20 | 0,18   | 314,58 |                           |          |
| 31-may. | 147 | frío     | 633640,25               | 9255683,39 | 0,84 | 6,69 | 0,24   | 300,83 | 0,198                     | -56,978  |
|         |     | caliente | 633618,06               | 9255723,40 | 0,28 | 0,29 | 0,22   | 317,79 |                           |          |
| 2-jun.  | 149 | frío     | 633640,53               | 9255683,74 | 0,86 | 7,05 | 0,33   | 298,01 | 0,129                     | -34,544  |
|         |     | caliente | 633610,07               | 9255724,46 | 0,26 | 0,25 | 0,20   | 315,67 |                           |          |



## b. Diagrama de cajas del calor sensible del aire (H)

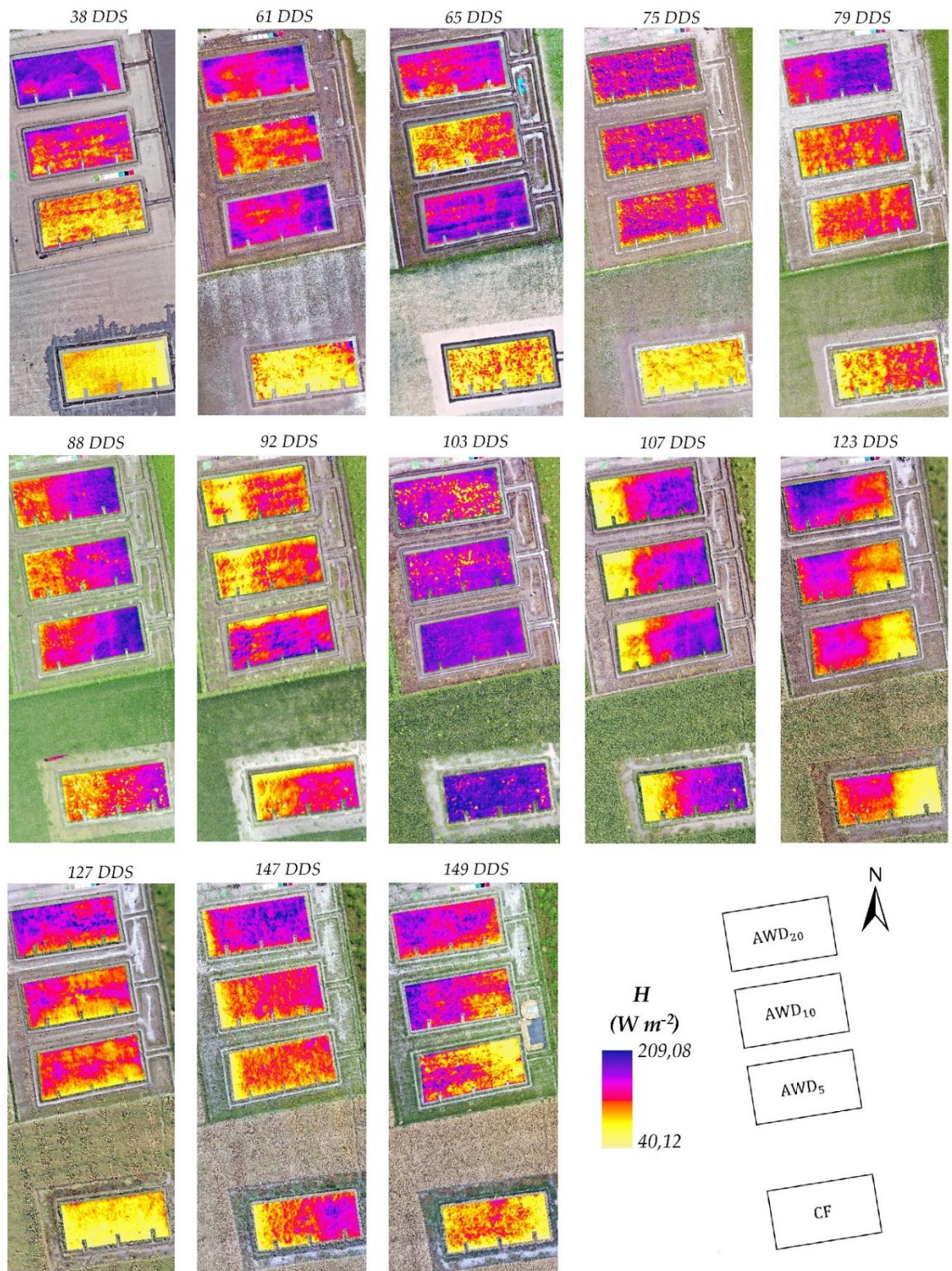
La Figura 15 representa el diagrama de cajas de la variación temporal del calor sensible del aire (H) para cada tratamiento, y de las 13 fechas de monitoreo con el UAV.



**Figura 15: Diagrama de cajas del H para los tratamientos CF y AWD, durante los días de vuelo del UAV**

En la Figura 15 se muestra los valores del H calculados por el modelo METRIC, obteniéndose valores mínimos a máximos para cada manejo de riego: CF de 40,12 a 188,55  $\text{W m}^{-2}$ , AWD<sub>5</sub> de 50,17 a 186,36  $\text{W m}^{-2}$ , AWD<sub>10</sub> de 52,22 a 189,31  $\text{W m}^{-2}$  y AWD<sub>20</sub> de 52,30 a 209,08  $\text{W m}^{-2}$ . De igual manera, la Figura 16 muestra la variación espacial de los resultados obtenidos para el componente de calor sensible del aire.

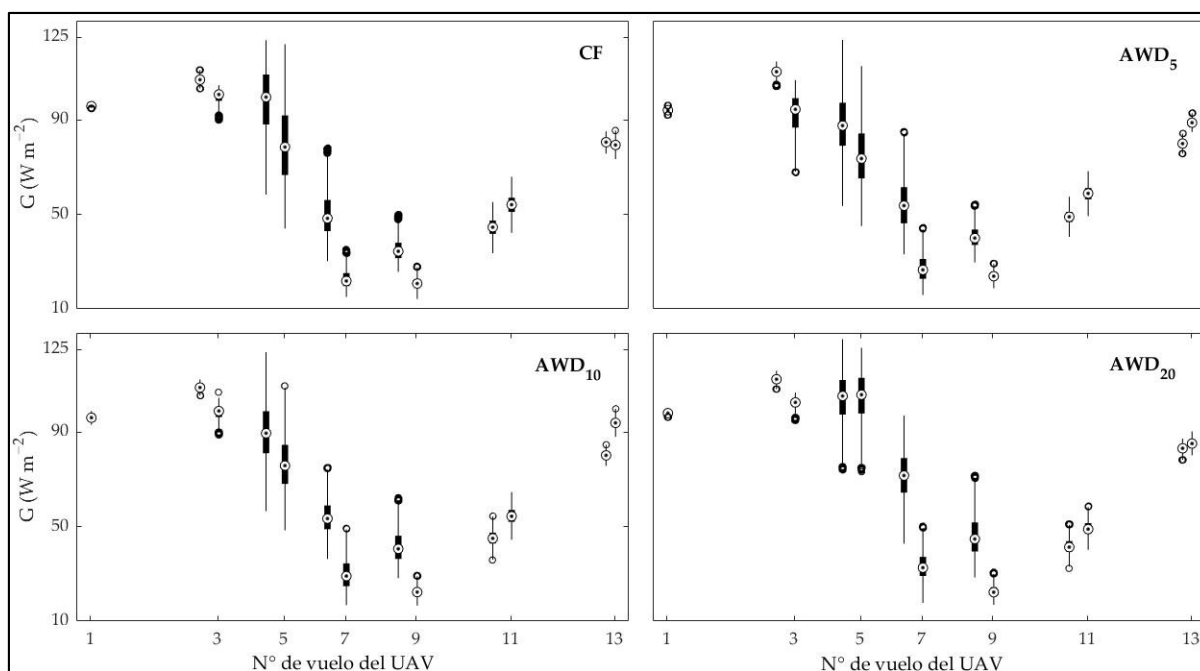
Estos resultados están cerca al obtenido por Lee & Kim (2016) y Acharya & Sharma (2021) con un rango de valores de 50 a 400  $\text{W m}^{-2}$ . Con respecto a los valores bajos obtenidos en este estudio, según Nassar *et al.* (2021), los elementos que componen el equilibrio energético alcanzan su punto máximo al mediodía, aunque este pico cambia dependiendo a la estación del año que nos encontremos (verano, primavera, otoño, invierno), siendo el verano la estación con los valores más elevados.



**Figura 16: Variación espacial de  $H$  en fase vegetativa (38 a 92 DDS), fase reproductiva (103 a 127 DDS) y fase de maduración (147 y 149 DDS) del cultivo de arroz**

### 4.2.3. Flujo del calor del suelo (G)

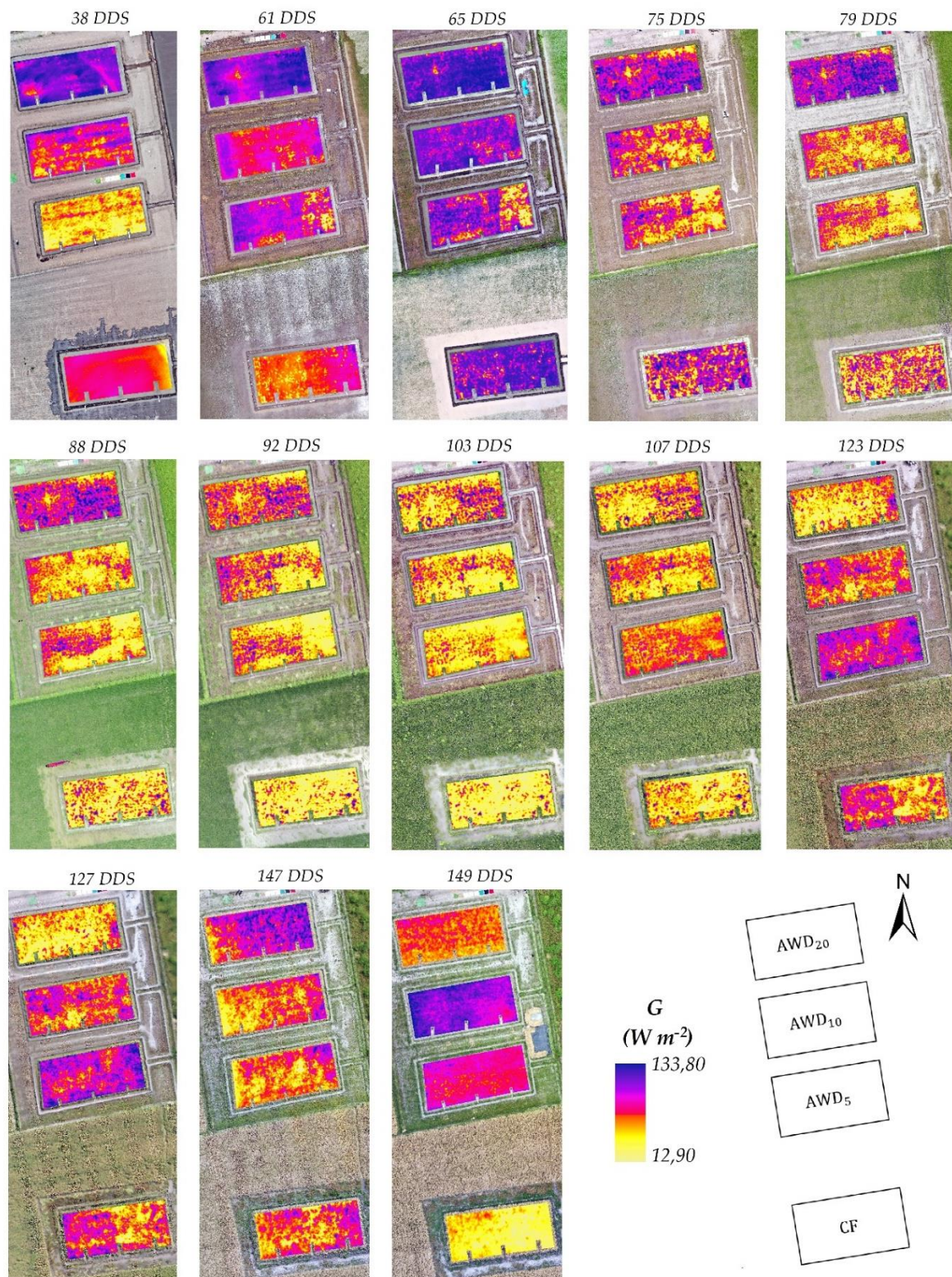
La Figura 17 representa el diagrama de cajas G, para cada tratamiento, y de las 13 fechas de vuelos realizados con el UAV.



**Figura 17: Diagrama de cajas de G para los tratamientos CF y AWD, durante los días de vuelo del UAV**

La Figura 17 muestra valores de G, calculados por el modelo METRIC. En el que se obtuvieron valores mínimos a máximos para cada manejo de riego: CF de 12,90 a 125,37 W m<sup>-2</sup>, AWD<sub>5</sub> de 14,67 a 126,23 W m<sup>-2</sup>, AWD<sub>10</sub> de 15,67 a 127,36 W m<sup>-2</sup> y AWD<sub>20</sub> de 16,12 a 133,80 W m<sup>-2</sup>. De igual manera, la Figura 18 muestra la variación espacial de los resultados obtenidos para el componente de calor del suelo. Estos resultados corresponden al rango indicado por Nassar *et al.* (2021) de 0 a 180 W m<sup>-2</sup>.

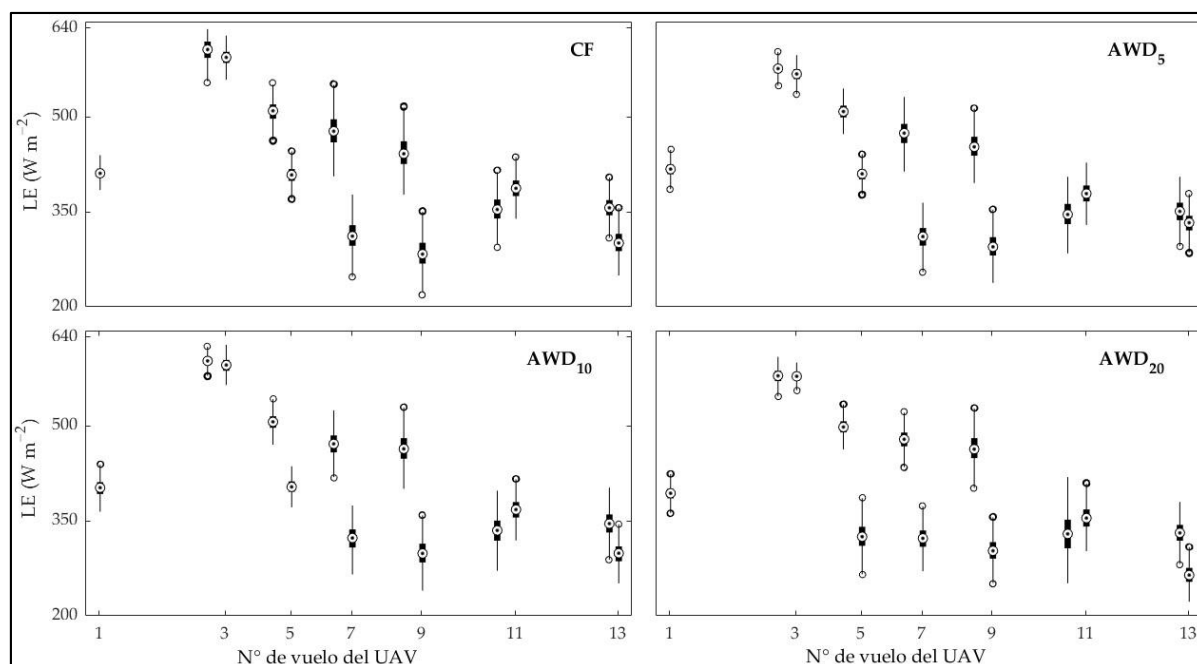




**Figura 18: Variación espacial de  $G$  en fase vegetativa (38 a 92 DDS), fase reproductiva (103 a 127 DDS) y fase de maduración (147 y 149 DDS) del cultivo de arroz**

#### 4.2.4. Flujo de calor latente (LE)

Se presenta el diagrama de cajas de la variación temporal del calor latente (LE) para cada tratamiento (Figura 19), en las 13 fechas de vuelos realizados con el UAV.

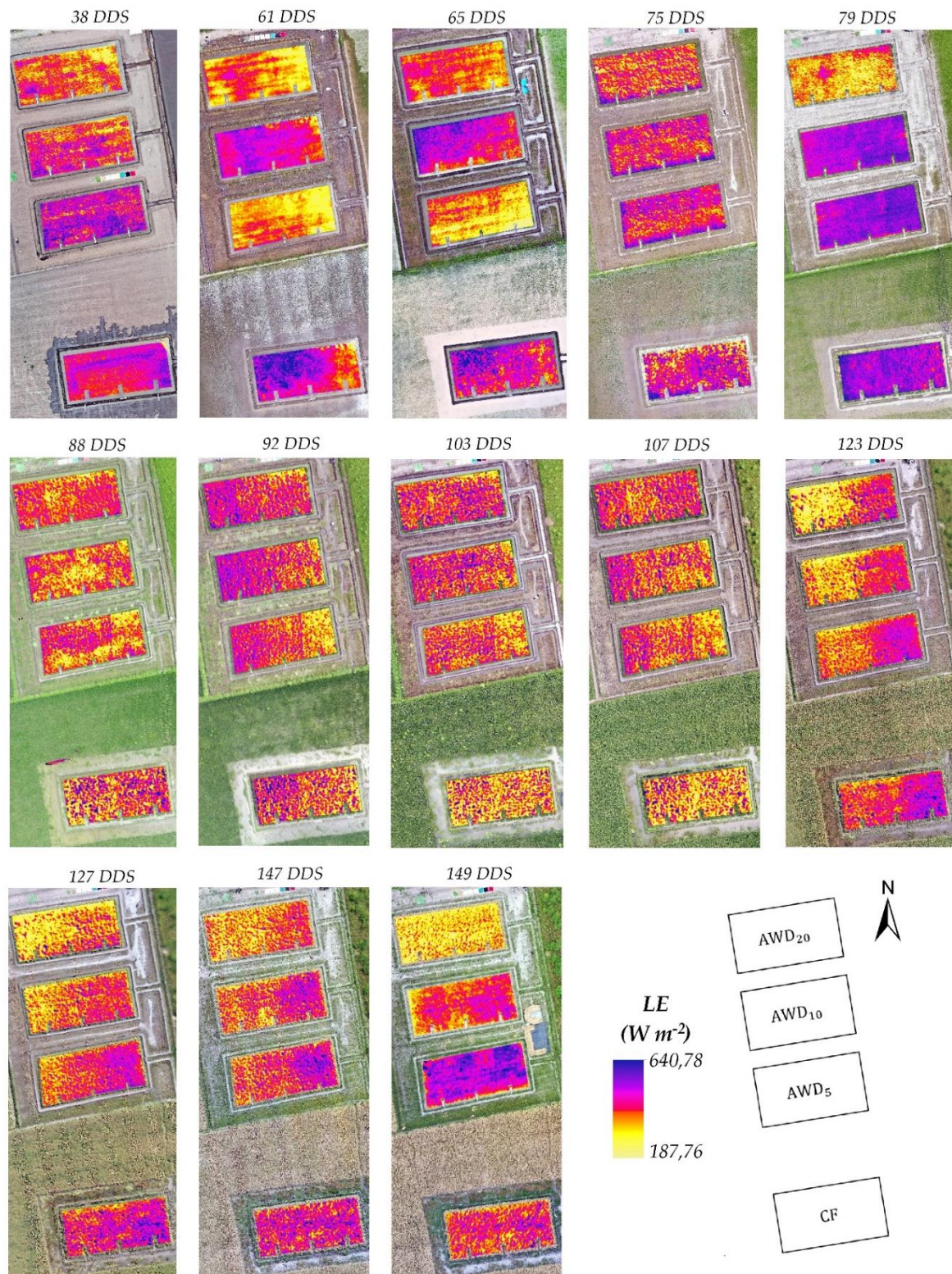


**Figura 19: Diagrama de cajas de LE para los tratamientos CF y AWD, durante los días de vuelos del UAV**

La Figura 19 muestra los valores de LE calculados por el modelo METRIC, en el que se obtuvieron valores mínimos a máximos para cada manejo de riego: CF de 203,58 a 640,75  $W m^{-2}$ , AWD<sub>5</sub> de 212,88 a 617,66  $W m^{-2}$ , AWD<sub>10</sub> de 220,86 a 635,20  $W m^{-2}$  y AWD<sub>20</sub> de 187,76 a 615,36  $W m^{-2}$ . De igual manera, la Figura 20 muestra la variación espacial de los resultados obtenidos para el componente de calor latente.

Según Montibeller *et al.* (2017) estos valores de LE pueden variar dependiendo en la fase fenológica que se encuentre el cultivo.



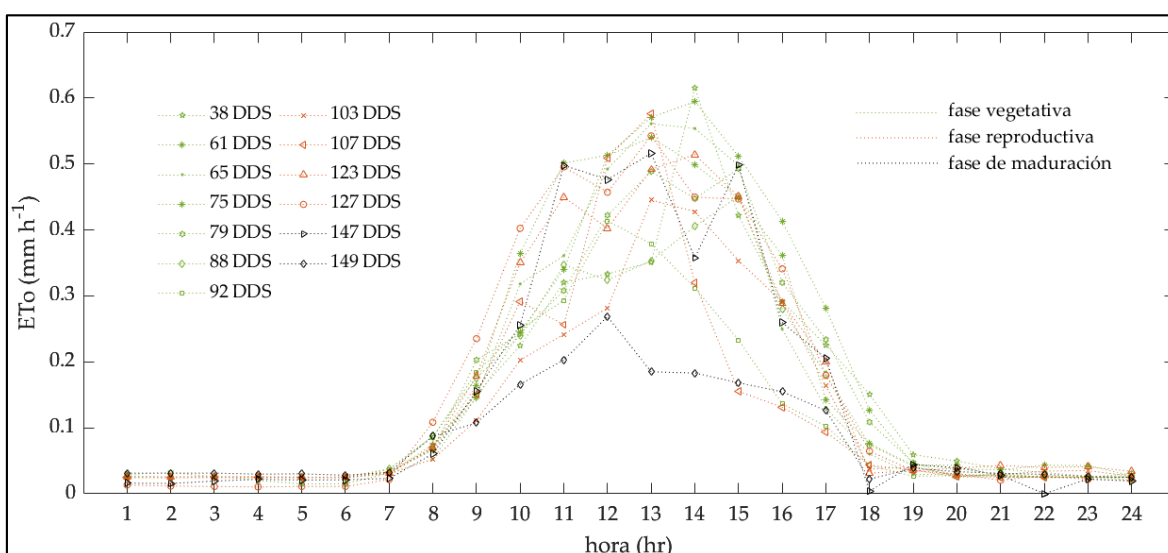


**Figura 20: Variación espacial del calor latente (LE) en fase vegetativa (38 a 92 DDS), fase reproductiva (103 a 127 DDS) y fase de maduración (147 y 149 DDS) del cultivo de arroz**

### 4.3. Evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ )

#### 4.3.1. $ET_c$ por balance de energía

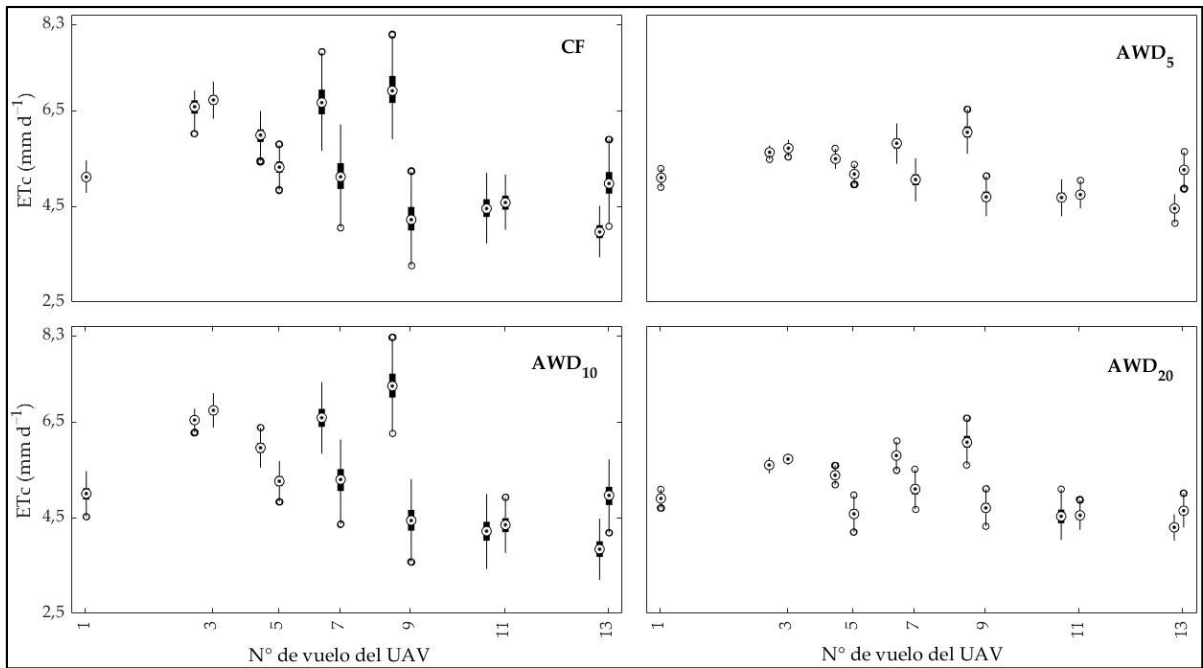
La Figura 21 muestra la variación horaria de la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) durante las 24 horas de los 13 días de vuelos y calculados por Penman – Monteith con los datos de la estación meteorológica portátil ATMOS 41. Los días de vuelo están agrupados según la fase en que se encuentra el cultivo: fase vegetativa (38 DDS, 61 DDS, 65 DDS, 75 DDS, 79 DDS, 88 DDS, 92 DDS), fase reproductiva (103 DDS, 107 DDS, 123 DDS, 127 DDS) y fase de maduración (147 DDS, 149 DDS).



**Figura 21: Variación horaria de la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) durante las 24 horas del día en las 13 fechas de vuelos del UAV**

Con respecto a lo que se visualiza en la Figura 21, a las 7:00 horas empieza a subir la  $ET_o$  llegando al pico más alto a partir de las 12:00 horas e incluso para algunos días hasta las 14:00 horas, aproximadamente. Sin embargo, la  $ET_o$  es baja a partir de las 18:00 horas debido a que en las noches no hay radiación solar lo que provoca que la superficie terrestre se enfríe hasta la salida del sol (las 7:00 horas).

La Figura 22 presenta el diagrama de cajas de la variación temporal de  $ET_c$  para cada tratamiento, y en las 13 fechas de vuelos realizados con el UAV.

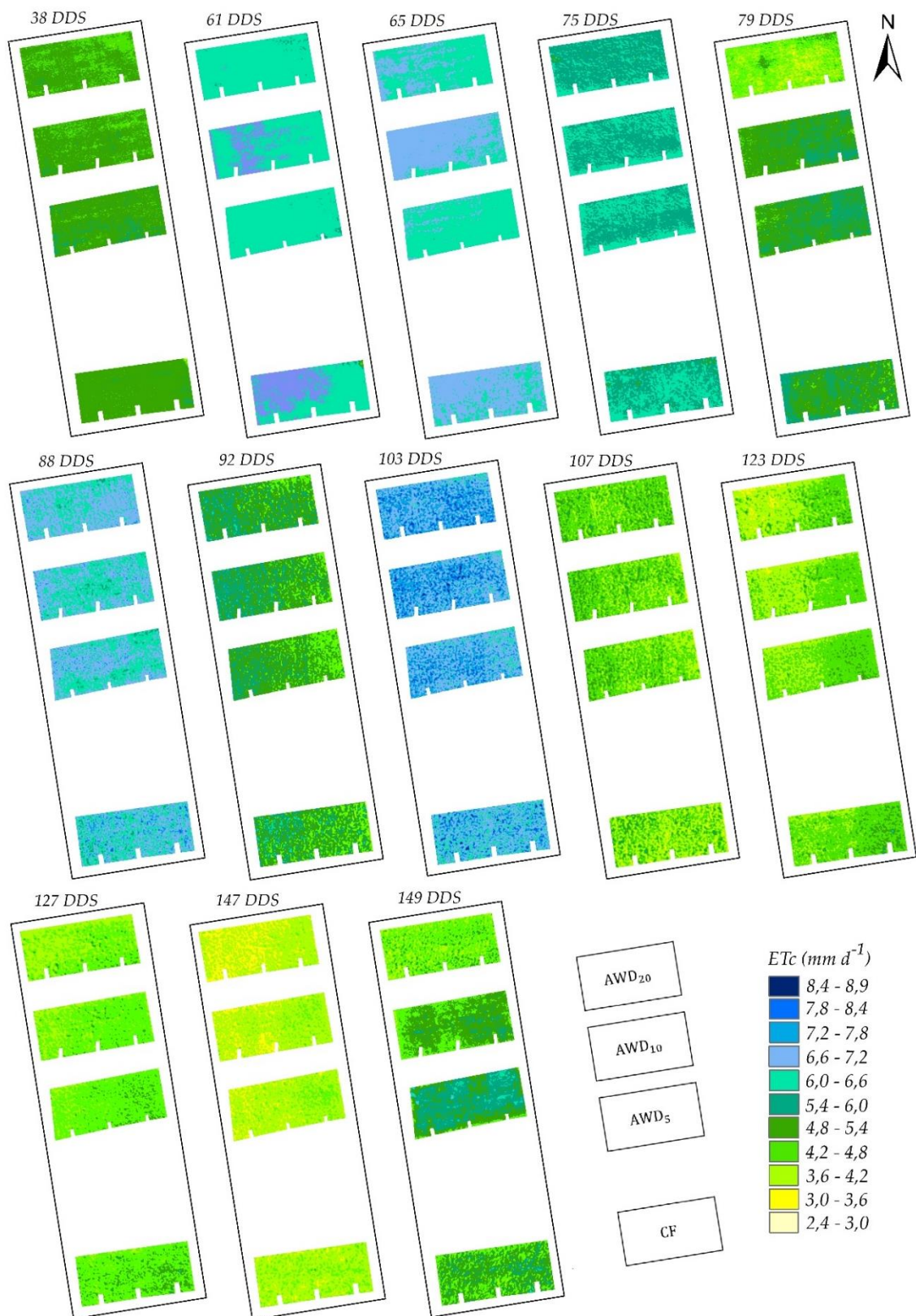


**Figura 22: Diagrama de cajas del  $ET_c$  para los tratamientos CF y AWD, durante los días de vuelos del UAV**

Se tiene los valores de la  $ET_c$  estimados por el modelo METRIC (Figura 22), en el que se obtuvieron valores mínimos a máximos para cada manejo de riego: CF de 3,01 a 8,90  $mm\ d^{-1}$ ,  $AWD_5$  de 2,93 a 8,47  $mm\ d^{-1}$ ,  $AWD_{10}$  de 2,75 a 8,77  $mm\ d^{-1}$  y  $AWD_{20}$  de 2,47 a 8,78  $mm\ d^{-1}$ . De igual manera, la Figura 23 muestra la variación espacial de la  $ET_c$  diaria según las fases del cultivo (vegetación, reproductiva y maduración) y bajo los diferentes regímenes de riego.

Estos valores coinciden con Alamo y Toro (2022) de 2,6 a 14  $mm\ d^{-1}$ , donde su lugar de estudio corresponde a las mismas condiciones climáticas que se realizó el presente trabajo. Así como también, cercanos a Quille *et al.* (2021) de 1,65 a 7,48  $mm\ d^{-1}$ , y con valores promedios de 7,07 y 6,54  $mm\ d^{-1}$  de Ramos *et al.* (2024).





**Figura 23: Variación espacial de la ET<sub>c</sub> en fase vegetativa (38 a 92 DDS), fase reproductiva (103 a 127 DDS) y fase de maduración (147 y 149 DDS) del cultivo de arroz**

De la Figura 23, el primer vuelo (38 DDS) presenta resultados un poco altos debido a que ese día se inició el vuelo del UAV a las 14:35 horas. Entonces, al estar con agua y con poco dosel de las plantas de arroz, las parcelas se fueron calentando durante las horas transcurridas, provocando la alteración del mosaico térmico.

Los valores promedios de  $ET_C$  registrados en los días 61 y 65 DDS, se muestran elevados debido a la presencia de lluvias constantes provenientes del ciclón Yaku y a precipitaciones anómalas que se presentaron durante en los días previos a los vuelos del UAV. Además, hubieron días de seca debido a problemas técnicos con la tubería del canal (tubería rota) que se evidenciaron en los resultados de los vuelos de los días 75 y 79 DDS.

Se tiene los resultados de la relación entre  $ET_C$  y  $ET_O$  en cada día de vuelo realizado con el UAV (Tabla 10). Los valores de la relación son cercanos con Rayo y Londoño (2014) de 0 a 2, donde se empleó sensores remotos.

**Tabla 10: Relación entre  $ET_C$  y  $ET_O$**

| DDS | $ET_C / ET_O$ |                  |                   |                   |
|-----|---------------|------------------|-------------------|-------------------|
|     | CF            | AWD <sub>5</sub> | AWD <sub>10</sub> | AWD <sub>20</sub> |
| 38  | 1,406         | 1,421            | 1,367             | 1,322             |
| 61  | 1,749         | 1,666            | 1,729             | 1,679             |
| 65  | 1,751         | 1,687            | 1,766             | 1,724             |
| 75  | 1,342         | 1,322            | 1,321             | 1,303             |
| 79  | 1,436         | 1,429            | 1,413             | 1,243             |
| 88  | 2,003         | 1,997            | 1,993             | 2,001             |
| 92  | 1,818         | 1,797            | 1,853             | 1,848             |
| 103 | 2,281         | 2,314            | 2,347             | 2,331             |
| 107 | 1,416         | 1,476            | 1,495             | 1,519             |
| 123 | 1,164         | 1,136            | 1,100             | 1,081             |
| 127 | 1,153         | 1,129            | 1,095             | 1,061             |
| 147 | 1,107         | 1,091            | 1,075             | 1,031             |
| 149 | 2,407         | 2,609            | 2,384             | 2,124             |

En las Tablas 11 y 12 se muestran lo obtenido en NDVI, IAF y componentes del balance energético, por cada régimen de riego.

**Tabla 11: Resumen de resultados de los componentes del balance energético, ET<sub>c</sub> y otros resultados durante la fase vegetativa**

|                         | Fase vegetativa |                |                |                |                |                |                |
|-------------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                         | 38 DDS          | 61 DDS         | 65 DDS         | 75 DDS         | 79 DDS         | 88 DDS         | 92 DDS         |
| <b>CF</b>               |                 |                |                |                |                |                |                |
| Albedo                  | 0,16 ± 0,01     | 0,11 ± 0,02    | 0,10 ± 0,01    | 0,18 ± 0,02    | 0,21 ± 0,03    | 0,24 ± 0,04    | 0,23 ± 0,05    |
| Térmica                 | 30,00 ± 0,21    | 30,57 ± 0,46   | 29,10 ± 0,29   | 31,76 ± 1,25   | 31,09 ± 1,89   | 27,96 ± 0,32   | 26,47 ± 0,27   |
| NDVI                    | 0,02 ± 0,03     | 0,20 ± 0,10    | 0,39 ± 0,13    | 0,61 ± 0,11    | 0,71 ± 0,11    | 0,81 ± 0,07    | 0,88 ± 0,05    |
| IAF                     | 0,05 ± 0,01     | 0,17 ± 0,11    | 0,57 ± 0,49    | 1,81 ± 1,04    | 3,83 ± 1,11    | 5,17 ± 0,92    | 5,42 ± 0,59    |
| Rn                      | 644,95 ± 10,63  | 766,39 ± 16,83 | 781,30 ± 14,01 | 721,55 ± 17,24 | 646,95 ± 22,32 | 592,97 ± 40,41 | 399,12 ± 32,20 |
| G                       | 95,70 ± 0,53    | 107,05 ± 1,82  | 98,42 ± 5,42   | 97,77 ± 14,49  | 79,05 ± 17,78  | 51,07 ± 11,74  | 23,70 ± 6,30   |
| H                       | 138,65 ± 3,09   | 54,98 ± 2,82   | 89,29 ± 4,75   | 117,47 ± 4,60  | 161,05 ± 7,54  | 62,45 ± 1,94   | 61,91 ± 2,28   |
| LE                      | 410,60 ± 12,18  | 604,36 ± 19,25 | 593,59 ± 13,97 | 506,32 ± 20,19 | 406,85 ± 19,57 | 479,45 ± 30,92 | 313,52 ± 28,22 |
| ET <sub>c</sub>         | 5,11 ± 0,15     | 6,55 ± 0,21    | 6,71 ± 0,16    | 5,96 ± 0,23    | 5,30 ± 0,25    | 6,70 ± 0,43    | 5,14 ± 0,46    |
| <b>AWD<sub>5</sub></b>  |                 |                |                |                |                |                |                |
| Albedo                  | 0,15 ± 0,01     | 0,12 ± 0,01    | 0,11 ± 0,02    | 0,16 ± 0,02    | 0,21 ± 0,03    | 0,24 ± 0,04    | 0,23 ± 0,04    |
| Térmica                 | 29,38 ± 0,35    | 31,85 ± 0,46   | 29,64 ± 0,41   | 32,52 ± 1,21   | 31,21 ± 1,09   | 28,48 ± 0,40   | 26,82 ± 0,40   |
| NDVI                    | 0,18 ± 0,04     | 0,32 ± 0,10    | 0,56 ± 0,11    | 0,71 ± 0,07    | 0,74 ± 0,08    | 0,80 ± 0,07    | 0,85 ± 0,05    |
| IAF                     | 0,13 ± 0,03     | 0,32 ± 0,21    | 1,37 ± 0,84    | 2,77 ± 1,04    | 4,16 ± 0,95    | 4,93 ± 0,87    | 5,08 ± 0,62    |
| Rn                      | 651,63 ± 13,05  | 748,85 ± 9,61  | 764,03 ± 14,94 | 727,30 ± 16,10 | 647,26 ± 21,80 | 592,94 ± 33,01 | 402,41 ± 28,50 |
| G                       | 94,08 ± 0,89    | 109,44 ± 2,87  | 91,72 ± 9,40   | 88,04 ± 13,38  | 74,70 ± 14,47  | 54,97 ± 11,48  | 27,61 ± 6,85   |
| H                       | 141,83 ± 4,37   | 63,91 ± 2,63   | 105,47 ± 4,66  | 131,46 ± 6,82  | 164,06 ± 4,91  | 64,54 ± 1,91   | 64,31 ± 2,73   |
| LE                      | 415,72 ± 16,08  | 575,50 ± 10,35 | 566,83 ± 12,02 | 507,81 ± 15,26 | 408,49 ± 17,95 | 473,43 ± 23,70 | 310,49 ± 22,42 |
| ET <sub>c</sub>         | 5,17 ± 0,20     | 6,25 ± 0,11    | 6,42 ± 0,14    | 5,98 ± 0,18    | 5,33 ± 0,23    | 6,62 ± 0,33    | 5,10 ± 0,37    |
| <b>AWD<sub>10</sub></b> |                 |                |                |                |                |                |                |
| Albedo                  | 0,15 ± 0,01     | 0,10 ± 0,01    | 0,10 ± 0,01    | 0,16 ± 0,02    | 0,21 ± 0,03    | 0,24 ± 0,03    | 0,21 ± 0,04    |
| Térmica                 | 30,22 ± 0,48    | 31,40 ± 0,45   | 29,21 ± 0,25   | 32,92 ± 1,25   | 31,36 ± 1,14   | 28,22 ± 0,33   | 26,48 ± 0,25   |
| NDVI                    | 0,14 ± 0,04     | 0,25 ± 0,07    | 0,45 ± 0,10    | 0,70 ± 0,07    | 0,73 ± 0,08    | 0,80 ± 0,05    | 0,83 ± 0,06    |
| IAF                     | 0,10 ± 0,02     | 0,21 ± 0,10    | 0,70 ± 0,44    | 2,65 ± 0,97    | 4,05 ± 0,86    | 4,91 ± 0,69    | 4,79 ± 0,71    |
| Rn                      | 646,88 ± 13,20  | 769,34 ± 8,50  | 785,68 ± 12,19 | 730,84 ± 15,06 | 644,83 ± 20,45 | 589,88 ± 29,50 | 413,39 ± 28,25 |
| G                       | 96,10 ± 1,12    | 108,82 ± 1,54  | 97,30 ± 4,83   | 90,07 ± 12,79  | 76,55 ± 13,38  | 54,88 ± 8,94   | 30,34 ± 7,42   |
| H                       | 149,75 ± 5,47   | 59,79 ± 2,35   | 93,34 ± 4,72   | 134,24 ± 7,40  | 164,56 ± 5,21  | 63,32 ± 1,87   | 60,98 ± 1,99   |
| LE                      | 401,03 ± 16,74  | 600,73 ± 10,58 | 595,03 ± 12,71 | 506,52 ± 16,16 | 403,72 ± 16,59 | 471,68 ± 22,42 | 322,07 ± 22,90 |
| ET <sub>c</sub>         | 4,99 ± 0,21     | 6,52 ± 0,11    | 6,73 ± 0,14    | 5,96 ± 0,19    | 5,26 ± 0,22    | 6,59 ± 0,31    | 5,28 ± 0,38    |
| <b>AWD<sub>20</sub></b> |                 |                |                |                |                |                |                |
| Albedo                  | 0,15 ± 0,01     | 0,11 ± 0,01    | 0,10 ± 0,01    | 0,15 ± 0,02    | 0,23 ± 0,02    | 0,21 ± 0,03    | 0,21 ± 0,04    |
| Térmica                 | 31,02 ± 0,31    | 32,52 ± 0,55   | 29,99 ± 0,38   | 33,96 ± 1,34   | 35,07 ± 1,83   | 28,93 ± 0,59   | 26,52 ± 0,32   |
| NDVI                    | 0,11 ± 0,03     | 0,21 ± 0,06    | 0,41 ± 0,09    | 0,62 ± 0,09    | 0,56 ± 0,12    | 0,70 ± 0,09    | 0,81 ± 0,06    |
| IAF                     | 0,09 ± 0,02     | 0,16 ± 0,07    | 0,53 ± 0,33    | 1,72 ± 0,85    | 2,51 ± 0,92    | 3,67 ± 0,90    | 4,46 ± 0,70    |
| Rn                      | 647,16 ± 13,41  | 753,70 ± 9,09  | 779,46 ± 7,63  | 736,83 ± 15,60 | 603,67 ± 19,28 | 613,06 ± 28,73 | 416,02 ± 26,37 |
| G                       | 97,88 ± 0,74    | 112,33 ± 1,63  | 101,21 ± 4,04  | 103,15 ± 12,30 | 102,70 ± 14,01 | 71,45 ± 11,49  | 33,80 ± 7,24   |
| H                       | 157,58 ± 3,94   | 64,24 ± 2,67   | 100,29 ± 4,48  | 135,63 ± 7,50  | 176,44 ± 6,44  | 64,10 ± 1,98   | 60,70 ± 2,26   |
| LE                      | 391,70 ± 14,93  | 578,13 ± 11,79 | 577,95 ± 9,09  | 498,05 ± 17,15 | 324,53 ± 28,92 | 477,52 ± 19,16 | 321,52 ± 21,51 |
| ET <sub>c</sub>         | 4,88 ± 0,19     | 6,28 ± 0,13    | 6,54 ± 0,10    | 5,88 ± 0,20    | 4,25 ± 0,37    | 6,68 ± 0,27    | 5,28 ± 0,35    |

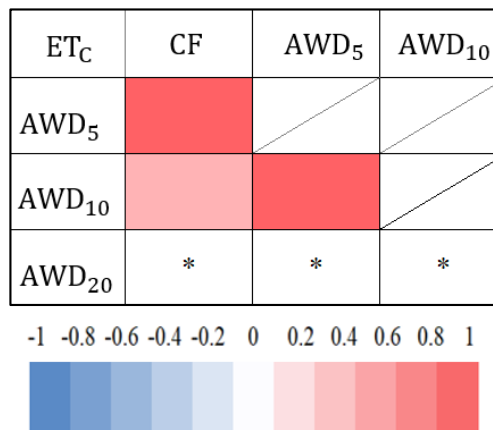


**Tabla 12: Resumen de resultados de los componentes del balance energético, ET<sub>c</sub> y otros resultados durante la fase reproductiva y de maduración**

|                         | Fase reproductiva |                |                |                | Fase de maduración |                |
|-------------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|----------------|
|                         | 103 DDS           | 107 DDS        | 123 DDS        | 127 DDS        | 147 DDS            | 149 DDS        |
| <b>CF</b>               |                   |                |                |                |                    |                |
| Albedo                  | 0,27 ± 0,04       | 0,28 ± 0,04    | 0,25 ± 0,03    | 0,25 ± 0,03    | 0,23 ± 0,03        | 0,27 ± 0,03    |
| Térmica                 | 28,30 ± 0,23      | 24,71 ± 0,46   | 25,62 ± 0,79   | 27,55 ± 0,25   | 30,08 ± 0,71       | 27,78 ± 0,61   |
| NDVI                    | 0,88 ± 0,03       | 0,89 ± 0,02    | 0,78 ± 0,03    | 0,75 ± 0,03    | 0,46 ± 0,04        | 0,47 ± 0,04    |
| IAF                     | 7,42 ± 1,26       | 7,74 ± 1,00    | 4,76 ± 0,74    | 3,93 ± 0,72    | 0,82 ± 0,20        | 0,86 ± 0,19    |
| Rn                      | 552,78 ± 36,29    | 374,32 ± 29,91 | 485,10 ± 21,56 | 499,86 ± 21,24 | 509,76 ± 22,25     | 522,43 ± 23,92 |
| G                       | 36,47 ± 7,61      | 21,24 ± 3,46   | 44,58 ± 4,20   | 53,91 ± 4,40   | 80,52 ± 1,89       | 79,40 ± 2,31   |
| H                       | 70,62 ± 1,59      | 65,57 ± 3,74   | 84,49 ± 5,80   | 57,54 ± 2,99   | 72,49 ± 3,98       | 140,30 ± 3,34  |
| LE                      | 445,69 ± 31,20    | 287,52 ± 29,10 | 356,03 ± 24,37 | 388,41 ± 21,64 | 356,75 ± 21,92     | 302,73 ± 23,35 |
| ET <sub>c</sub>         | 6,97 ± 0,49       | 4,28 ± 0,43    | 4,49 ± 0,31    | 4,60 ± 0,26    | 3,97 ± 0,24        | 5,01 ± 0,39    |
| <b>AWD<sub>5</sub></b>  |                   |                |                |                |                    |                |
| Albedo                  | 0,26 ± 0,03       | 0,26 ± 0,03    | 0,25 ± 0,02    | 0,24 ± 0,02    | 0,24 ± 0,03        | 0,20 ± 0,02    |
| Térmica                 | 28,43 ± 0,42      | 24,82 ± 0,50   | 26,24 ± 0,64   | 28,24 ± 0,29   | 29,79 ± 0,58       | 30,51 ± 0,76   |
| NDVI                    | 0,86 ± 0,02       | 0,87 ± 0,01    | 0,75 ± 0,03    | 0,72 ± 0,03    | 0,46 ± 0,04        | 0,37 ± 0,05    |
| IAF                     | 6,90 ± 0,95       | 6,99 ± 0,62    | 4,09 ± 0,63    | 3,33 ± 0,58    | 0,78 ± 0,18        | 0,50 ± 0,16    |
| Rn                      | 565,66 ± 30,20    | 386,01 ± 22,91 | 482,79 ± 19,80 | 502,23 ± 18,43 | 501,98 ± 24,04     | 562,72 ± 18,55 |
| G                       | 41,14 ± 6,09      | 24,05 ± 2,25   | 48,80 ± 3,41   | 58,60 ± 3,80   | 80,01 ± 1,84       | 88,83 ± 1,82   |
| H                       | 69,91 ± 0,86      | 65,48 ± 3,61   | 87,56 ± 5,20   | 64,74 ± 3,50   | 70,76 ± 2,74       | 142,35 ± 4,83  |
| LE                      | 454,62 ± 25,67    | 296,48 ± 23,04 | 346,43 ± 22,91 | 378,88 ± 19,57 | 351,21 ± 23,52     | 331,54 ± 20,46 |
| ET <sub>c</sub>         | 7,11 ± 0,40       | 4,41 ± 0,34    | 4,37 ± 0,29    | 4,49 ± 0,23    | 3,91 ± 0,26        | 5,50 ± 0,34    |
| <b>AWD<sub>10</sub></b> |                   |                |                |                |                    |                |
| Albedo                  | 0,25 ± 0,04       | 0,26 ± 0,04    | 0,27 ± 0,03    | 0,26 ± 0,02    | 0,25 ± 0,03        | 0,21 ± 0,01    |
| Térmica                 | 28,02 ± 0,32      | 24,68 ± 0,49   | 26,27 ± 0,70   | 28,20 ± 0,39   | 30,04 ± 0,63       | 32,86 ± 1,26   |
| NDVI                    | 0,85 ± 0,04       | 0,88 ± 0,02    | 0,78 ± 0,03    | 0,75 ± 0,03    | 0,46 ± 0,04        | 0,33 ± 0,03    |
| IAF                     | 7,02 ± 1,41       | 7,20 ± 0,87    | 4,72 ± 0,66    | 3,93 ± 0,60    | 0,81 ± 0,17        | 0,38 ± 0,07    |
| Rn                      | 577,14 ± 33,78    | 388,24 ± 24,85 | 470,52 ± 22,13 | 488,40 ± 19,39 | 497,76 ± 24,60     | 539,36 ± 15,33 |
| G                       | 42,73 ± 8,86      | 22,80 ± 3,10   | 45,31 ± 3,77   | 54,56 ± 3,99   | 80,12 ± 1,75       | 93,91 ± 2,35   |
| H                       | 68,60 ± 1,77      | 64,93 ± 3,68   | 89,40 ± 4,94   | 65,61 ± 4,24   | 72,24 ± 3,29       | 147,06 ± 4,49  |
| LE                      | 465,81 ± 27,52    | 300,51 ± 24,18 | 335,82 ± 24,27 | 368,23 ± 19,99 | 345,41 ± 23,71     | 298,40 ± 19,12 |
| ET <sub>c</sub>         | 7,29 ± 0,43       | 4,47 ± 0,36    | 4,24 ± 0,30    | 4,36 ± 0,24    | 3,85 ± 0,26        | 4,96 ± 0,31    |
| <b>AWD<sub>20</sub></b> |                   |                |                |                |                    |                |
| Albedo                  | 0,24 ± 0,04       | 0,25 ± 0,04    | 0,27 ± 0,04    | 0,27 ± 0,03    | 0,25 ± 0,03        | 0,28 ± 0,03    |
| Térmica                 | 28,01 ± 0,29      | 24,71 ± 0,60   | 26,63 ± 0,67   | 28,48 ± 0,41   | 31,28 ± 0,78       | 30,47 ± 0,70   |
| NDVI                    | 0,83 ± 0,06       | 0,88 ± 0,02    | 0,81 ± 0,03    | 0,78 ± 0,02    | 0,44 ± 0,03        | 0,44 ± 0,03    |
| IAF                     | 6,54 ± 1,67       | 7,22 ± 0,97    | 5,47 ± 0,76    | 4,82 ± 0,63    | 0,72 ± 0,13        | 0,71 ± 0,12    |
| Rn                      | 580,39 ± 34,55    | 392,68 ± 25,68 | 466,68 ± 30,19 | 477,28 ± 23,17 | 490,72 ± 22,39     | 498,22 ± 20,63 |
| G                       | 47,29 ± 10,88     | 23,11 ± 3,73   | 41,86 ± 3,95   | 49,43 ± 3,94   | 82,89 ± 2,00       | 85,25 ± 2,01   |
| H                       | 67,46 ± 2,42      | 64,98 ± 3,93   | 93,95 ± 5,69   | 71,00 ± 4,88   | 77,13 ± 3,71       | 147,83 ± 3,46  |
| LE                      | 465,64 ± 26,88    | 304,60 ± 22,86 | 330,87 ± 32,22 | 356,85 ± 23,52 | 330,69 ± 21,45     | 265,14 ± 19,40 |
| ET <sub>c</sub>         | 7,28 ± 0,42       | 4,53 ± 0,34    | 4,17 ± 0,40    | 4,23 ± 0,28    | 3,69 ± 0,24        | 4,40 ± 0,32    |

De las tablas 11 y 12, los valores obtenidos para el NDVI de 0,02 a 0,93 está cerca con lo mencionado por Allen *et al.* (2013) de 0,10 a 0,96 y coinciden con Morton *et al.* (2013) de 0,02 a 0,94.

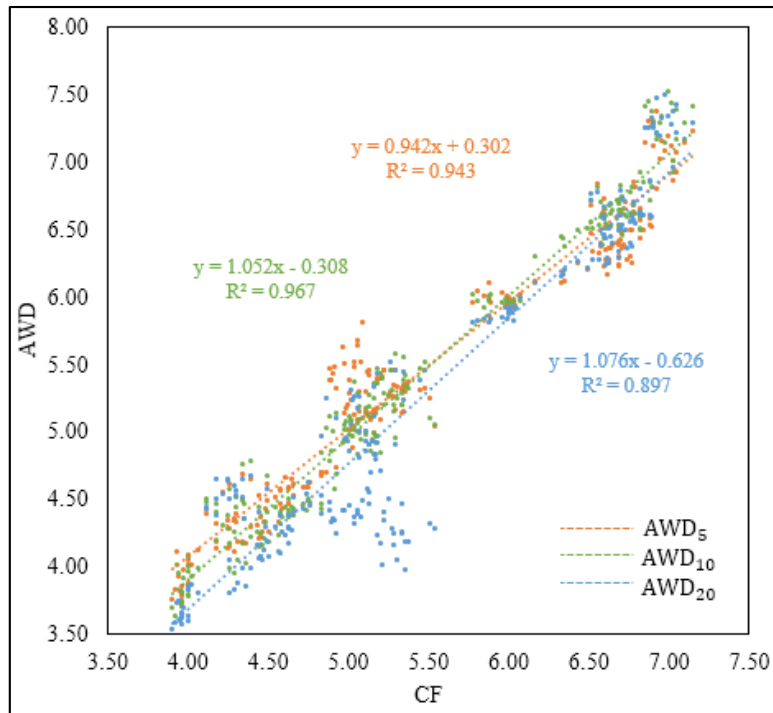
La correlación no paramétrica de Kruskal-Wallis y la prueba estadística de Dunn muestran que los efectos de los regímenes de riego influyeron significativamente ( $p < 0,05$ ) la evapotranspiración del cultivo (tablas 11 y 12). Para  $ET_C$ , se observan diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 24). Los valores oscilan entre  $5,24 \text{ mm d}^{-1}$  para el riego por  $AWD_{20}$  a  $5,45 \text{ mm d}^{-1}$  bajo el riego por inundación continua (CF). El régimen de riego AWD redujo la evapotranspiración del cultivo, disminuyendo a un 99,8%, 99,4% y 96,1% en  $AWD_5$ ,  $AWD_{10}$  y  $AWD_{20}$ , respectivamente.



**Figura 24: Correlación no paramétrica de Kruskal-Wallis y prueba estadística de Dunn entre regímenes de riego basados en la  $ET_C$**

Nota: (\*) indica diferencias significativas entre tratamientos ( $p < 0,05$ )

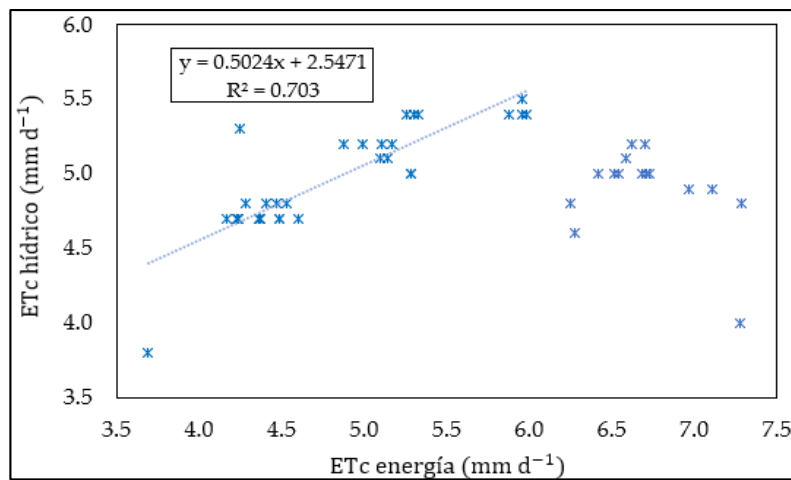
Del análisis obtenido de la prueba estadística de Dunn, se realizó la relación lineal entre la técnica de inundación continua (CF) y la técnica de riego AWD ( $AWD_5$ ,  $AWD_{10}$  y  $AWD_{20}$ ), Figura 25. Se estimó el  $R^2$  para cada AWD, las cuales fueron 0,943, 0,967 y 0,897 para  $AWD_5$ ,  $AWD_{10}$  y  $AWD_{20}$ , respectivamente.  $AWD_{20}$ , fue el tratamiento con mas diferencia en los resultados de  $ET_C$  respecto al riego por inundación continua (CF) debido a que este tratamiento fue el de corte de riego más extremo respecto a los demás ( $AWD_5$  y  $AWD_{10}$ ).



**Figura 25: Relación de la evapotranspiración ( $ET_c$ ) por balance de energía entre la técnica de inundación continua (CF) y la técnica de riego AWD ( $AWD_5$ ,  $AWD_{10}$  y  $AWD_{20}$ )**

#### 4.3.2. Comparación entre $ET_c$ por balance de energía y por balance hídrico

La ecuación entre  $ET_c$  por balance de energía y por balance hídrico es  $ET_{c(B. hídrico)} = 0,502 ET_{c(B. energía)} + 2,547$ , la cual presenta un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,703 y error cuadrático medio (RMSE) de 0,380 (Figura 26).



**Figura 26: Relación entre  $ET_c$  por balance de energía (método METRIC) y balance hídrico (AquaCrop)**

El grupo de datos no incluidos a la obtención de la ecuación (Figura 26), pertenecen a la fase de máximo macollamiento e inicios de floración. Estos mismos corresponden a los valores bajos de  $ET_c$  por balance hídrico en valores mayores a  $6,25 \text{ mm d}^{-1}$  por balance de energía. Entonces, no se está valorando correctamente los datos del  $ET_c$  por balance hídrico, posiblemente sea por el elevado nivel freático generado por el aporte de la napa freática.

La Tabla 13 muestra la lámina de agua que se requirió para cada técnica de riego (CF, AWD<sub>5</sub>, AWD<sub>10</sub>, AWD<sub>20</sub>), así mismo se dan a conocer valores de precipitación, percolación, evaporación, transpiración y evapotranspiración; resultados que también fueron obtenidos del modelo AquaCrop, previamente parametrizado.

**Tabla 13: Componentes del balance hídrico para cada técnica de riego (CF y AWD)**

| Técnica de riego  | Precipitación (mm) | Riego (mm) | Infiltración (mm) | Percolación (mm) | Evaporación (mm) | Transpiración (mm) | $ET_c$ (mm) |
|-------------------|--------------------|------------|-------------------|------------------|------------------|--------------------|-------------|
| CF                | 164,6              | 1997       | 2161,6            | 1723,3           | 398,5            | 340,4              | 738,9       |
| AWD <sub>5</sub>  | 164,6              | 1428       | 1592,6            | 1180,9           | 408,7            | 313,9              | 722,6       |
| AWD <sub>10</sub> | 164,6              | 1434       | 1598,6            | 1206,9           | 424,1            | 293,2              | 717,3       |
| AWD <sub>20</sub> | 164,6              | 1447       | 1611,6            | 1330,7           | 485,1            | 244,8              | 729,9       |

El riego tradicional (CF) ha requerido más agua (1997 mm) respecto a la técnica AWD, debido a la  $ET_c$  y a pérdidas por percolación (738,9 y 2161,6 mm, respectivamente). Así mismo, al analizar la técnica de riego AWD; AWD<sub>20</sub> es la que ha requerido más lámina de agua (1447 mm) con respecto a AWD<sub>5</sub> y AWD<sub>10</sub> (1428 y 1434 mm). Esto se debe al aporte de capilaridad que compensa a las zonas de raíces, generando que el suelo permanezca saturado, así como también de la pérdida por percolación de 1330,7 mm.

#### 4.3.3. Eficiencia de uso de agua

En este estudio, el consumo de agua osciló entre 14280 a 19970  $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (Tabla 14), siendo el de mayor consumo, el riego tradicional (CF) con 19970  $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . El rango de rendimiento fue de 15239,41 a 18015  $\text{kg ha}^{-1}$  (Tabla 14), siendo AWD<sub>10</sub> el de mejor rendimiento (17642,02  $\text{kg ha}^{-1}$ ) respecto a la técnica de riego AWD.

**Tabla 14: Eficiencia de uso de agua para cada técnica de riego (CF y AWD)**

| Técnica de riego  | Riego<br>m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> | Rendimiento<br>kg ha <sup>-1</sup> | Eficiencia de uso de agua<br>(kg m <sup>-3</sup> ) |
|-------------------|--|------------------------------------|--|
| CF                | 19970                                    | 18015,00                           | 0,902  |
| AWD <sub>5</sub>  | 14280                                    | 15239,41                           | 1,067  |
| AWD <sub>10</sub> | 14340                                    | 17642,02                           | 1,230  |
| AWD <sub>20</sub> | 14470                                    | 16600,71                           | 1,147  |

El consumo de agua coincide con lo mencionado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), la cantidad de agua utilizada para el cultivo de arroz en las costas norte y sur varía entre 14000 y 24000 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.

De la Tabla 14, se tiene que hay una eficiencia de uso de agua máxima de 1,230 kg m<sup>-3</sup> que corresponde a la técnica de riego AWD<sub>10</sub> que resulta beneficioso. Además, se elaboró la Tabla 15 para analizar el beneficio neto en cada manejo de riego (CF, AWD<sub>5</sub>, AWD<sub>10</sub>, AWD<sub>20</sub>). El riego por inundación continua (CF) no se necesitó controlar las malezas (*Butachlor* y *Florpyrauxifen-benzil*) debido a que se controlaba por el tipo de riego aplicado.

**Tabla 15: Beneficio neto para cada técnica de riego (CF y AWD)**

| Variables  | Técnica de riego |                  |                   |                   |
|--|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
|  | CF               | AWD <sub>5</sub> | AWD <sub>10</sub> | AWD <sub>20</sub> |
| Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )   | 18015,00         | 15239,41         | 17642,02          | 16600,71          |
| <b>Beneficio bruto</b> (soles ha <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup>                      | 24140,10         | 20420,81         | 23640,31          | 22244,96          |
| Costo de producción  | 13000            | 13000            | 13000             | 13000             |
| Costos variables:  |                  |                  |                   |                   |
| Pre emergente: <i>Butachlor</i> (soles ha <sup>-1</sup> ) <sup>(2)</sup>             | -                | 131,40           | 136,51            | 146,00            |
| Pos emergente: <i>Florpyrauxifen-benzil</i> (soles ha <sup>-1</sup> ) <sup>(3)</sup> | -                | 252,00           | 261,80            | 280,00            |
| Agua temporal (soles ha <sup>-1</sup> ) <sup>(4)</sup>                               | 835,55           | 597,48           | 599,99            | 605,43            |
| <b>Costo total</b> (soles ha <sup>-1</sup> )   | 13835,55         | 13980,88         | 13998,30          | 14031,43          |
| <b>Beneficio neto</b> (soles ha <sup>-1</sup> )                                      | 10304,55         | 6439,93          | 9642,01           | 8213,53           |

(1) Precio de arroz cáscara: 1,34 soles kg<sup>-1</sup> (agroperu.pe)

(2) Butachlor: 73 soles por bolsa de 25 kg (50 kg ha<sup>-1</sup>)

(3) Florpyrauxifen-benzil: 280 soles por litro (1litro ha<sup>-1</sup>)

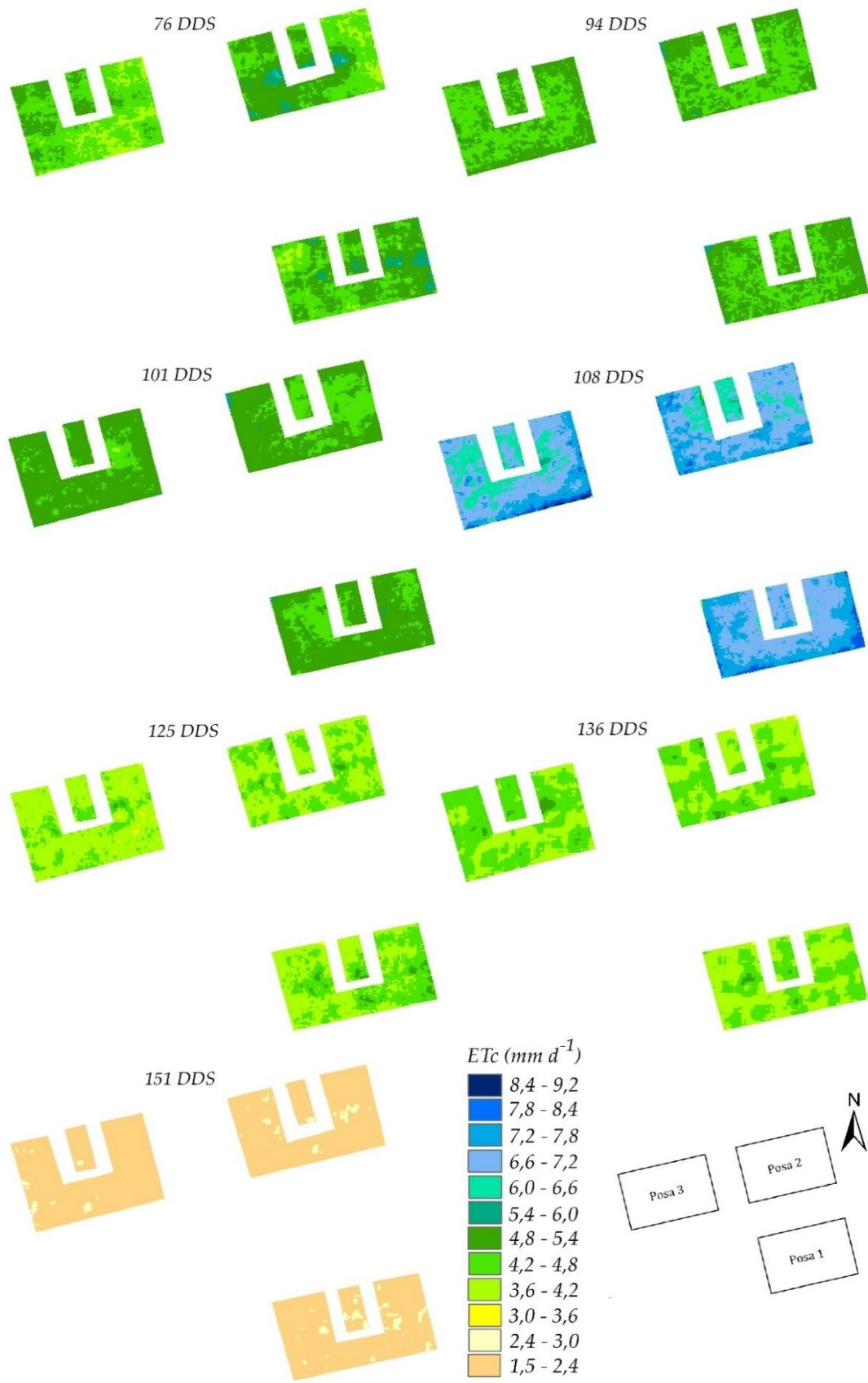
(4) Agua temporal: 0,0418 soles m<sup>-3</sup> (comisión de usuarios de agua, Lambayeque)

De los beneficios netos (Tabla 15), indica que la técnica de riego por CF (riego tradicional), es la que alcanza mayor beneficio neto en comparación a la técnica de riego AWD. En relación a la técnica de riego AWD, al comparar AWD<sub>5</sub>, AWD<sub>10</sub> y AWD<sub>20</sub>, el mayor beneficio neto lo alcanza AWD<sub>10</sub> con 9642,01 soles ha<sup>-1</sup> versus AWD<sub>5</sub> y AWD<sub>20</sub> con 6439,93 y 8213,53 soles ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Esto se debe a que el rendimiento en AWD<sub>10</sub> de 17642,02 kg ha<sup>-1</sup> es mejor, lo que resulta económicamente recomendable.

#### **4.3.4. ET<sub>c</sub> por balance energía y por balance hídrico en La Molina**

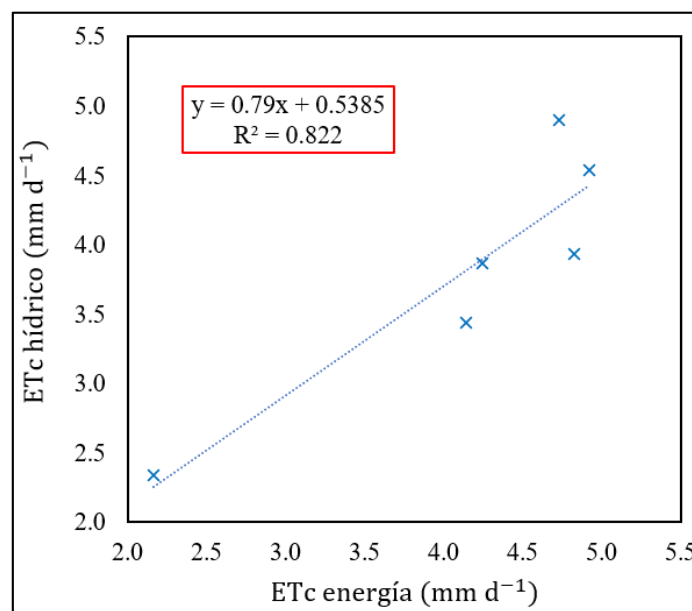
La selección del píxel de temperatura alta y baja con valores de NDVI, albedo, temperatura y las constantes de calibración conocidas como "a y b" están en el Anexo 8. Así mismo, los resultados de los componentes del balance energético, ET<sub>c</sub> y otros resultados durante la fase vegetativa, reproductiva y de maduración de cultivo para La Molina se verifica en el Anexo 9.

La Figura 27 representa la variación espacial de los valores de la ET<sub>c</sub>, obtenidos para la Molina, según información fenológica del cultivo que indican siete vuelos del UAV: fase vegetativa (76 y 94 DDS), fase reproductiva (101, 108, 125 y 136 DDS) y fase de maduración (151 DDS). Del Anexo 10 al Anexo 13 se muestran las figuras que representan a las variaciones espaciales de valores que corresponden a los componentes de la evapotranspiración del cultivo (R<sub>n</sub>, H, G y LE).



**Figura 27: Variación espacial de la  $ET_c$ , según fonología del cultivo**

En la Figura 26, se tiene valores de  $ET_c$  con un rango de 1,5 a 9,2  $\text{mm d}^{-1}$ . Estos valores están cercanos al rango indicado por Quille *et al.* (2021) de 1,65 a 7,48  $\text{mm d}^{-1}$ , donde su lugar de estudio corresponde a las mismas condiciones climáticas que se realizó el presente trabajo. Se halló otra relación entre la  $ET_c$  por balance de energía y por balance hídrico para La Molina (Figura 28), la cual fue encontrada de manera similar a lo realizado para Chiclayo. A partir de las variables simuladas en AquaCrop, se determinó la evapotranspiración hídrica para obtener la ecuación de evapotranspiración de  $ET_{c(B. hídrico)} = 0,793 ET_{c(B. energía)} + 0,539$  con  $R^2$  y RMSE de 0,822 y 0,522, respectivamente.



**Figura 28: Relación entre  $ET_c$  por balance de energía (método METRIC) y balance hídrico (AquaCrop) para La Molina**

De la Figura 26 y 28, para La Molina (Figura 28) el nivel freático si responde mejor por ello es que se muestra una mejor relación entre  $ET_c$  por balance de energía y por balance hídrico. Existe una variación en los resultados debido a las diferentes ubicaciones de los estudios, influenciadas por sus aspectos climáticos. En Chiclayo, se observaron temperaturas más altas y mayores precipitaciones, lo cual tuvo un impacto significativo en los resultados de la evapotranspiración en comparación con La Molina. Así mismo, la diferencia en los días después de la siembra (DDS) en que se realizaron los monitores, influyeron en la calibración térmica del UAV.



## V. CONCLUSIONES

1. Se requirió valores del agua de riego de 19970, 14280, 14340 y 14470 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> para CF, AWD<sub>5</sub>, AWD<sub>10</sub> y AWD<sub>20</sub>, respectivamente. Lo que representa un ahorro de agua del riego de 28,49, 28,19 y 27,54%, respectivamente, respecto al riego CF. Además, se presentó una reducción del rendimiento de 15,41, 2,07 y 7,85% para AWD<sub>5</sub>, AWD<sub>10</sub> y AWD<sub>20</sub>, respectivamente, que se traduce en un incremento de 18,30, 36,38 y 27,18% en la EUA de agua para AWD<sub>5</sub>, AWD<sub>10</sub> y AWD<sub>20</sub>, respectivamente, respecto al riego CF. Resultando AWD<sub>10</sub> como mejor alternativa para la EUA, debido a que presenta un ahorro de agua de riego del 28,19% y una reducción del rendimiento de 2,07%, respecto al riego CF.
2. Se encontró la relación entre IAF estimado por método extractivo y NDVI medido en campo, mediante una ecuación exponencial de correlación ( $Y_{IAF} = 0,0669e^{4,9257*NDVI}$ ) cuyo R<sup>2</sup> es de 0,513. A fin de obtener el IAF espacial que nos llevó a calcular la ET<sub>c</sub>. El IAF espacial tuvo el rango de valores de 0,05 a 7,74, de los cuales los valores más bajos son por pixeles de suelo desnudo.
3. Se determinó los componentes del balance de energía para el riego CF, donde los valores fueron entre 291,75 a 621,09 W m<sup>-2</sup> para Rn, entre 12,90 a 125,37 W m<sup>-2</sup> para G, entre 40,12 a 188,55 W m<sup>-2</sup> para H y entre 187,76 a 640,78 W m<sup>-2</sup> para LE. Así mismo se hizo para el riego AWD, donde los valores fueron entre 310,27 a 819,85 W m<sup>-2</sup> para Rn, entre 14,67 a 133,80 W m<sup>-2</sup> para G, entre 50,17 a 209,08 W m<sup>-2</sup> para H y entre 187,76 a 640,78 W m<sup>-2</sup> para LE. Lo que se concluye que el riego AWD tuvo un aumento de 6 a 32% para Rn, de 7 a 15% para G y de 11 a 25% para H, respecto al riego CF.
4. Se determinó la ET<sub>c</sub> por balance de energía (modelo METRIC) para los tratamientos CF, AWD<sub>5</sub>, AWD<sub>10</sub> y AWD<sub>20</sub>, cuyos resultados promedios fueron de 5,45, 5,44, 5,42 y 5,24 mm d<sup>-1</sup>, respectivamente. Por lo que la ET<sub>c</sub> por balance de energía tuvo una reducción de 0,18, 0,41 y 3,81% para AWD<sub>5</sub>, AWD<sub>10</sub> y AWD<sub>20</sub>, respectivamente, respecto al riego CF.

## **VI. RECOMENDACIONES**

1. Monitorear el nivel freático durante el desarrollo del cultivo (la variación temporal) a fin de evaluar el ascenso del nivel freático y el aporte de agua en las últimas fases del cultivo.
2. Realizar mayor colecta de información del IAF (método extractivo) a fin de representar mejor los valores del IAF espacial y dar mayor robustez al estudio.
3. Monitorear la aparición de malezas en el riego AWD debido a que, en el riego tradicional o inundado (CF), el agua controla la aparición de malezas.
4. Implementar la colecta de información con la aplicación de sensores proximales, termistores o termocuplas a fin de tener mayor calibración con la información del UAV. Así mismo, las colectas de información en campo deben ser en el mismo tiempo de vuelo para mayor exactitud de la información térmica.
5. Implementar un control automatizado del nivel de agua para técnicas de riego con ahorro de agua, con inversiones accesibles donde puedan ser aplicadas por pequeños agricultores a fin de tener una mejor gestión del agua de riego.
6. Realizar la valorización económica del impacto ambiental por el uso de la tecnología de riego AWD. Por ejemplo, el beneficio por el menor riesgo de salinización del suelo agrícola y menor emisión de gases de efecto invernadero.
7. Realizar el experimento en otras condiciones climáticas como por ejemplo en otra campaña (agosto-diciembre) en el distrito de Chongoyape, así como también, en arrozales de Tumbes, Piura a fin de dar mayor robustez a los estudios.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- Abdul, S., Kyei, N., Agyare, A. y Dogbe, W. (2018). Evaluación del efecto del riego en el rendimiento del arroz con cáscara mediante la aplicación del modelo AquaCrop en el norte de Ghana. *Springer, Singapur*. 93-116.
- 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.
- Alamo, R. y Toro, H. (2022). *Determinación de la evapotranspiración del cultivo de arroz aplicando el modelo METRIC con información de un VANT en Chongoyape, Lambayeque* (Tesis de pregrado). Universidad Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú. <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/10666>
- Ali, M., Savin, I., Poddubskiy, A., Abouelghar, M., Saleh, N., Abutaleb, K. y Dokukin, P. (2021). Método integrado para el seguimiento del cultivo de arroz utilizando datos de Sentinel-2 y el índice de área foliar. *Revista egipcia de teledetección y ciencia espacial*, 24 (3), 431-441.
- Allen, R.G., Burnett, B., Kramber, W., Huntington, J., Kjaersgaard, J., Kilic, A., Kelly, C. & Trezza, R. (2013). Automated calibration of the METRIC-Landsat evapotranspiration process. *Journal of the American Water Resources Association*. 49(3), 563–576. <https://doi.org/10.1111/jawr.12056>
- Allen, R.G., Tasumi, M. y Trezza, R. (2007). Balance de energía basado en satélites para mapear la evapotranspiración con el modelo de calibración internalizada (METRIC). *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 133(4), 380-394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007))
- Allen, R., Pereira, S., Raes, D. y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *FAO Riego y Drenaje*. 56, 297.
- Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R., Bastiaanssen, W. & Waters, R. (2002). *Manual for Surface Energy Balance Algorithms for Land*. 1-98.

- Bastiaanssen, W.G.M. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*. 229 (1-2): 87-100.
- Bastiaanssen, W.G.M., Molden, D.J. & Makin, I. (2000). Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Water Manag Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. Agricultural Water Management*. 46, 137-155.
- Bastiaanssen, W.G.M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J.F., Roerink, G.J. & van der Wal, T. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). *Journal of Hydrology* 212-213(JANUARY):213-229.
- Bastiaanssen, W.G.M. (1995). *Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: : a remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates* (Doctoral Thesis). Wageningen Agricultural University, Wageningen, Nederland. 273 p.
- Butler, P.F. y Prescott, J.A. (1955). Evapotranspiración de trigo y pasto en relación con la humedad disponible. *Revista Australiana de Investigación Agrícola*. 6, 52-61. <https://doi.org/10.1071/AR9550052>
- Carvalho, S., Van der Putten, W.H. & Hol, W.H.G. (2016). The potential of hyperspectral patterns of winter wheat to detect changes in soil microbial community composition. *Frontiers in Plant Science*, 7, 194453. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00759>
- Chu, R., Li, M., Shen, S., Islam, ARM, Cao, W., Tao, S. y Gao, P. (2017). Cambios en evapotranspiración de referencia y sus factores contribuyentes en Jiangsu, una importante provincia económica y agrícola del este de China. *Water*. 9 (7), 486. <https://doi.org/10.3390/w9070486>
- Dong, Q., Wang, W., Shao, Q., Xing, W., Ding, Y. & Fu, J. (2020). The response of reference evapotranspiration to climate change in Xinjiang, China: Historical changes, driving forces, and future projections. *Int. J. Climatol*. 40 (1), 235-254. <https://doi.org/10.1002/joc.6206>
- Durán, F. (2017). Balance de energía basado en satélites para mapear la evapotranspiración con el modelo de calibración internalizada (METRIC). *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 133(4), 380-394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339437(2007)133:4(380))
- Elsadek, E., Zhang, K., Mousa, A., Ezaz, G.T., Tola, T.L., Shaghaleh, H., Hamad, A.A.A. y Alhaj Hamoud, Y. (2023). Estudio sobre el balance hídrico en el campo del arroz de siembra directa con diversos regímenes de riego en condiciones climáticas áridas en

- Egipto utilizando el modelo AquaCrop. *Agronomía*, 13, 609. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020609>
- 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.
- Ferreira, S., Sánchez, J.M. & Gonçalves, J.M. (2023). A Remote-Sensing-Assisted Estimation of Water Use in Rice Paddy Fields: A Study on Lis Valley, Portugal. *Agronomy*, 13(5), 1357. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051357>
- Gao, X., Sun, M., Zhao, Q., Wu, P., Zhao, X., Pan, W., Wang, Y. (2017). Actual ET modelling based on the Budyko framework and the sustainability of vegetation water use in the loess plateau. *Science of The Total Environment*, 579, 1550–1559. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.163>
- Gong, Y., Yang, K., Lin, Z., Fang, S., Wu, X., Zhu, R. & Peng, Y. (2021). Remote estimation of leaf area index (LAI) with unmanned aerial vehicle (UAV) imaging for different rice cultivars throughout the entire growing season. *Plant Methods*, 17(1), 1-16.
- Gordillo, V.M., Flores, H., Tijerina, L. y Arteaga, R. (2014). Estimación de la evapotranspiración utilizando un balance de energía e imágenes satelitales. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(1), 143-149. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v5n1/v5n1a12.pdf>
- Guo, D., Westra, S. y Maier, HR. (2017). Sensibilidad de la evapotranspiración potencial a cambios en las variables climáticas para diferentes zonas climáticas australianas, *Hydrol. Sistema Tierra Science*, 21, 2107–2126. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2107-2017>
- Han, M., Zhan, H., De Jonge, K.C., Comas, L.C. & Gleason, S. (2018). Comparison of Three Crop Water Stress Index Models with Sap Flow Measurements in Maize. *Agricultural Water Management*, 203: 366-75.
- Hussain, S., Mubeen, M., Nasim, W., Fahad, S., Ali, M., Ehsan, M.A. & Raza, A. (2023). Investigation of irrigation water requirement and evapotranspiration for water resource management in Southern Punjab, Pakistan. *Sustainability*, 15(3), 1768. <https://doi.org/10.3390/su15031768>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2022). Producción de principales productos agroindustriales. Recuperado de <https://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/economia/>

- Kra, J.L., Adahi, M. B., Konan-Waidhet, B.A., N'Guessan, J.Y.K., Koné, J.D. & Assidjo, E.N. (2023). Estimation of the Actual Evapotranspiration by the SEBAL Method in the Irrigated Rice Perimeter of Zatta (Yamoussoukro-Côte d'Ivoire). *Journal of Water Resource and Protection*, 15(10), 539-556. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2023.1510030>
- Kumar, A., Nayak, A.K., Hanjagi, P.S., Kumari, K., Vijayakumar, S., Mohanty, S., Tripathi, R. & Panneerselvam, P. (2021). Submergence stress in rice: Adaptive mechanisms, coping strategies and future research needs. *Environmental and Experimental Botany*, 104448. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104448>.
- 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.
- Lin, L., Zhang, B. & Xiong, L.H. (2012). Evaluación del rendimiento del arroz con cáscara al riego y manejo del suelo con la aplicación del modelo AquaCrop. *Sociedad Estadounidense de Ingenieros Agrícolas y Biológicos*. 55: 839-848.
- Liu, Y., Zhang, S., Zhang, J., Tang, L., Bai, Y. (2021). Assessment and comparison of six machine learning models in estimating evapotranspiration over croplands using remote sensing and meteorological factors. *Remote Sensing*. 13 (19), 3838. <https://doi.org/10.3390/rs13193838>
- Loor, S., Kimberly, M., Jirón, Z. y Jofiel, R. (2017). *Comparación de la eficacia, días control y selectividad de seis herbicidas para el cultivo de arroz (Oryza sativa L.) bajo riego por goteo* (Tesis de pregrado). Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/6108>
- Machaca, R., Pino, E., Ramos, L., Quille, J. y Torres, A. (2022). 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. *Idesia (Arica)*. 40(2), 55-65. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292022000200055>
- Moguel, E., Tijerina, L., Quevedo, A., Crespo, G. y Haro, G. (2001). Evapotranspiración y balance de energía en el cultivo de alfalfa. *Agro ciencia*, vol. 35(1), 13-21. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30235102>
- Montibeller, A.G. (2017). *Estimating energy fluxes and evapotranspiration of corn and soybean with an unmanned aircraft system in Ames, Iowa*. Dissertations and Theses, University of Northern Iowa.

- 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, 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), 2887.
- Neira, E., Ramos, L., & Razuri, L. (2020). Coeficiente de cosecha (Kc) de arroz a partir de lisímetro de drenaje en La Molina, Lima-Perú. *IDESIA (Chile)*. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292020000200049>
- Nie, T., Tang, Y., Jiao, Y., Li, N., Wang, T., Du, C., Zhang, Z., Chen, P., Li, T.Sun, Z. & Zhu, S. (2022). Efectos de los programas de riego sobre el rendimiento del maíz y la eficiencia del uso del agua en escenarios climáticos futuros en la provincia de Heilongjiang basados en el modelo AquaCrop. *Agronomía*, 12, 810. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040810>
- Niu, H., Hollenbeck, D., Zhao, T., Wang, D. & Chen, Y. (2020). Evapotranspiration Estimation with Small UAVs in Precision Agriculture. *Sensors*, 20, 6427. <https://doi.org/10.3390/s20226427>
- Núñez, C.M. (2009). *Modelación del flujo de calor del suelo y aplicación de algoritmo de cálculo de evapotranspiración mediante teledetección* (Tesis de Maestría). Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile. 152 p.
- Ortega, S., Ortega, S., Poblete, T., Kilic, A., Allen, R., Poblete, C., Ahumada, 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. <https://doi.org/10.3390/rs8080638>
- Pádua, L., Vanko, J., Hruška, J., Adão, T., Sousa, JJ, Peres, E. y Morais, R. (2017). UAS, sensores y procesamiento de datos en agroforestería: una revisión hacia aplicaciones prácticas. *Revista internacional de teledetección*, 38 (8-10), 2349-2391.
- Pan, J., Cui, K., Wei, D., Huang, J., Xiang, J. & Nie, L. (2011). Relationships of non-structural carbohydrates accumulation and translocation with yield formation in rice recombinant inbred lines under two nitrogen levels. *Physiologia Plantarum*, 141(4), 321-331. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2010.01441.x>

- Pan, S., Chen, G., Ren, W., Dangal, S.R., Banger, K., Yang, J., Tao, B. & Tian, H. (2018). Responses of global terrestrial water use efficiency to climate change and rising atmospheric CO<sub>2</sub> concentration in the twenty-first century. *Int. J. Digit. Earth* 11 (6), 558–582. <https://doi.org/10.1080/17538947.2017.1337818>
- Pérez, E.H. (1967). Un paso de C. Thornthwaite hacia una clasificación racional del clima. *Revista Ingeniería hidráulica, México*. <https://dialnet.unirioja.es>
- Pintér, K. & Nagy, Z. (2022). Building a UAV Based System to Acquire High Spatial Resolution Thermal Imagery for Energy Balance Modelling. *Sensors*, 22, 3251. <https://doi.org/10.3390/s22093251>
- Porras-Jorge, R., Ramos-Fernández, L., Ojeda-Bustamante, W. & Ontiveros-Capurata, 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. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.03.03>
- Quille, J., Ramos, F., Ontiveros, R., Ojeda, W. y Jorge, R. (2019). Relación de la altura de planta del cultivo de arroz bajo estrés hídrico con índices de vegetación obtenidas de imágenes de dron. *Colegio Mexicano de Ingenieros en Irrigación (COMIIR)*. <https://www.riego.mx/congresos/comeii2019/docs/ponencias/extenso/COMIIR-19043.pdf>
- Quille, J., Ramos, L. y Ontiveros, R.E. (2021). Estimación de la evapotranspiración del cultivo de arroz en Perú mediante el algoritmo METRIC e imágenes RPA. *Asociación Española de Teledetección*, 16. <https://doi.org/10.4995/raet.2021.136999>
- Quispe, D. (2021). *Estimación de la evapotranspiración del cultivo de arroz mediante la aplicación de los modelos SEBAL y METRIC usando imágenes multiespectrales*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, Perú. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5169>
- Raes, D. (2017). Manuales de capacitación de AquaCrop: Libro I: Comprensión de AquaCrop. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, pág. 50.
- Ramos Fernández, L., Quispe Tito, D., Altamirano Gutiérrez, L., Cruz Grimaldo, C.L., Quille Mamani, J.A., Carbonell Rivera, J.P., Torralba, I. y Ángel Ruiz, L. (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. *In Scientia Agropecuaria*. Universidad Nacional de Trujillo. Facultad de Ciencia Agropecuarias. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2024.001>



- Rayo, A.M. y Londoño, E.A. (2014). *Estimación de la evapotranspiración en cultivos de arroz con sensores remotos* (Tesis de pregrado). Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.
- Río, O., Espinoza, T., Sáenz, A. y Córtes, F. (2019). Levantamientos Topográficos con Drones. *Revista Ciencia, Ingeniería y Desarrollo Tecnológico Lerdo*, 1(5), 15-19.
- Sánchez, M. (2001). Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, N° 28, p. 3-10.
- Santos, C., Lorite, I., Tasumi, M., Allen, R. & Fereres, E. (2010). Performance assessment of an irrigation scheme using indicators determined with remote sensing techniques. *Irrigation Science*, 28, 461-477.
- 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. <https://doi.org/10.3390/ijgi9080484>
- Serrano Reyes, J., Jiménez, J.U., Quirós-McIntire, E.I., Sanchez-Galan, J.E. Fábrega, J.R. (2023). Comparación de dos métodos de estimación del índice de área foliar del arroz (*Oryza sativa L.*) utilizando mediciones espectrorradiométricas en el campo e imágenes satelitales multiespectrales. *AgriEngineering*, 5 (2), 965-981.
- SENAMHI. (2023). *Boletín Climático Nacional (marzo 2023)*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
- Soto, P.J.L. (2013). Contraste de hipótesis. Comparación de más de dos medias independientes mediante pruebas no paramétricas: Prueba de Kruskal-Wallis. *Revista Enfermería del Trabajo*, 3(4), 166-171.
- Surendran, U., Raja, P., Jayakumar, M. & Subramoniam, S.R. (2021). Use of efficient water saving techniques for production of rice in India under climate change scenario: A critical review. *J. Clean. Prod.*, 309, 127272.
- Vieira Passos, M.L., Zambrzycki, G.C. & Pereira, R.S. (2016). Balango hídrico e classificagáo climática para uma determinada região de Chapadinha-MA. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 10 (4): 758-766.
- Vijayakumar, S., Kumar, D., Ramesh, K., Jinger, D. & Rajpoot, S.K. (2022). Effect of Potassium fertilization on water productivity, irrigation water use efficiency, and grain quality under direct seeded rice-wheat cropping system. *J. Plant Nutr.*, 45: 2023–2038.

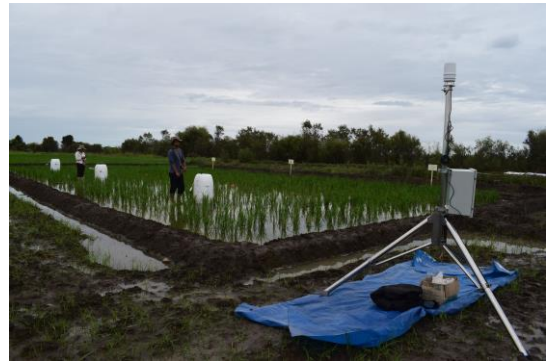
Walter, I.A., Allen, R.G., Elliott, R., Jensen, M.E., Itenfisu, D., Mecham, B., Howell, T.A., Snyder, R., Brown, P., Echings, S., Spofford, T., Hattendorf, M., Cuenca, R.H., Wright, J.L. & Martin, D. (2001). ASCE's standardized reference evapotranspiration equation. *Watershed Management and Operations Management*, 2000:1-11.

## **VIII. ANEXOS**

**Anexo 1: Panel fotográfico de la visita de campo a las parcelas experimentales instaladas en la EEA "Vista Florida" del INIA -Chiclayo**



a. Parcelas experimentales instaladas en la EEA, "Vista Florida" del INIA - Chiclayo.



b. Captación de información de la estación portátil ATMOS 41.



c. Instalación de telas a las coberturas.



d. Preparación de las coberturas para la toma de datos con el radiómetro.



e. Preparación para el inicio del vuelo.



d. Dron Matrix 300 en campo, Chiclayo.





e. Vuelo del dron Matrix 300.



f. Ultimo día de monitoreo (151 DDS).

**Anexo 2: Panel fotográfico de la visita de campo a las pozas experimentales instaladas en el AER de la UNALM - La Molina**



a. Toma de temperatura en La Molina.



b. Preparación para iniciar el monitoreo con el UAV.



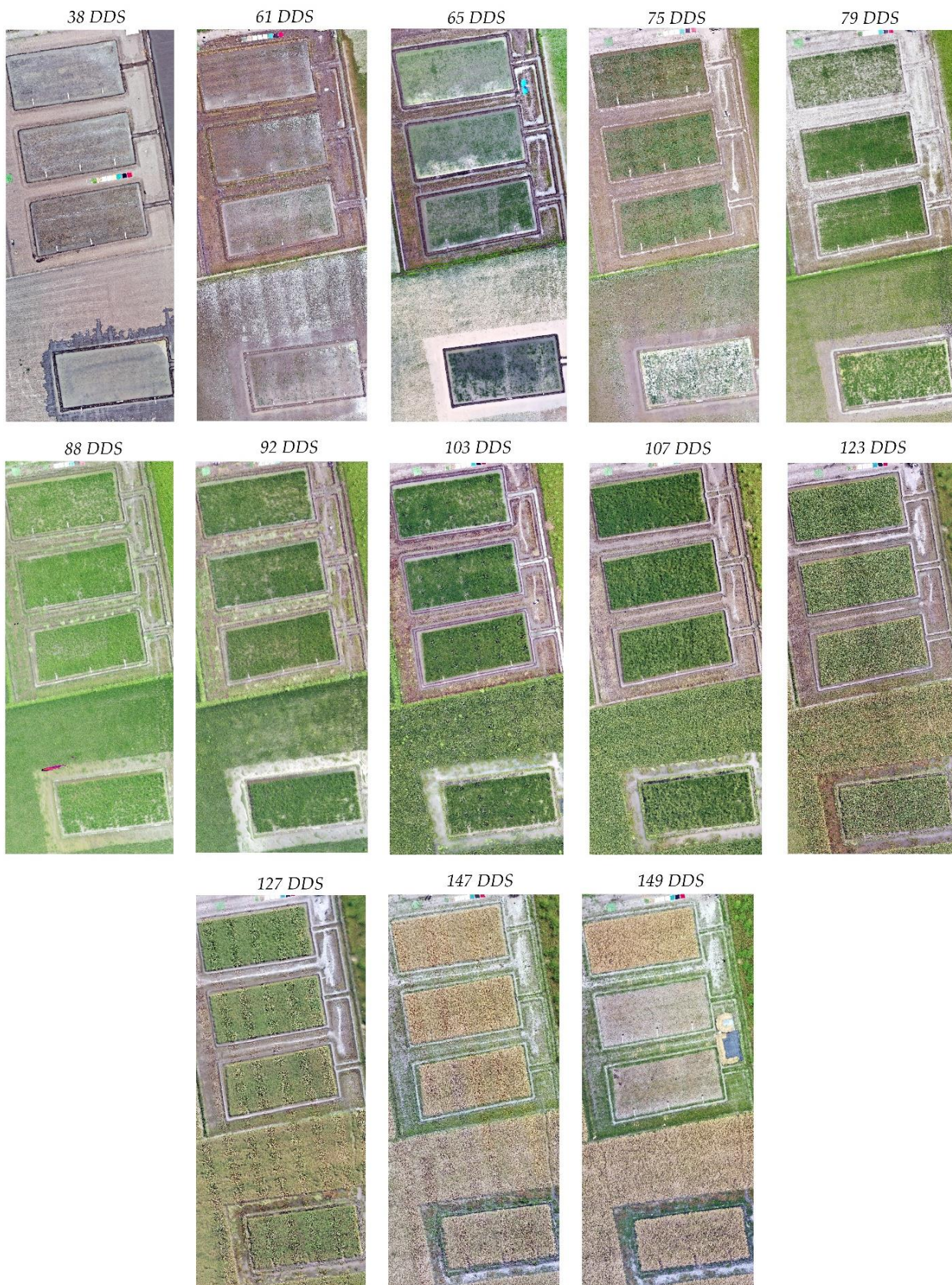
c. Aplicación de insecticidas en los arrozales de La Molina.



d. Cosecha de arroz en La Molina.



### Anexo 3: Imágenes RGB procesadas en el software Pix4D





#### Anexo 4: Data meteorológica de las 24 horas de cada día de vuelo realizado

|               | <i>Temperatura del aire</i><br>C° | <i>Humedad Relativa</i><br>% | <i>Velocidad del viento</i><br>m/s | <i>Presión Atmosférica</i><br>hPa | <i>Radiación Solar</i><br>W/m <sup>2</sup> |
|---------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--|
| <b>11-Feb</b> | 22.973333                         | 83.183333                    | 1.6365                             | 1004.8333                         | 0  |
|               | 23.078333                         | 81.556667                    | 1.313                              | 1004                              | 0  |
|               | 22.84                             | 84.35                        | 2.0913333                          | 1003.8333                         | 0  |
|               | 22.97                             | 84.216667                    | 1.0436667                          | 1003                              | 0  |
|               | 22.763333                         | 86.366667                    | 0.5315                             | 1003.5                            | 0  |
|               | 22.358333                         | 89.183333                    | 0.8326667                          | 1004                              | 0  |
|               | 22.391667                         | 89.883333                    | 1.4788333                          | 1004                              | 12.15                                      |
|               | 22.501667                         | 90.833333                    | 1.2535                             | 1005                              | 95.35                                      |
|               | 22.458333                         | 83.771667                    | 1.3531667                          | 963.71667                         | 201.95                                     |
|               | 24.706667                         | 78.558333                    | 1.9363333                          | 1005.6667                         | 289.71667                                  |
|               | 25.868333                         | 71.403333                    | 1.4261667                          | 1005                              | 420.26667                                  |
|               | 26.93                             | 65.993333                    | 1.7681667                          | 1005                              | 408.38333                                  |
|               | 27.118333                         | 65.95                        | 2.2718333                          | 1004.3333                         | 422.91667                                  |
|               | 27.811667                         | 65.405                       | 3.384                              | 1003.3333                         | 838.45                                     |
|               | 28.061667                         | 62.256667                    | 3.4108333                          | 1002.5                            | 498.15                                     |
|               | 26.876667                         | 66.636667                    | 4.385                              | 1002                              | 290.55                                     |
|               | 26.105                            | 69.741667                    | 4.266                              | 1001.1667                         | 216.4                                      |
|               | 25.92                             | 69.91                        | 4.0245                             | 1001.1667                         | 111.6                                      |
|               | 25.361667                         | 72.606667                    | 3.886                              | 1002.3333                         | 24.75                                      |
|               | 24.613333                         | 75.451667                    | 3.144                              | 1003.1667                         | 0  |
|               | 24.425                            | 76.663333                    | 1.9221667                          | 1004                              | 0  |
|               | 24.121667                         | 80.446667                    | 1.9215                             | 1004.5                            | 0  |
|               | 23.988333                         | 82.083333                    | 1.5015                             | 1005                              | 0  |
|               | 23.628                            | 85.42                        | 1.179                              | 1004.6                            | 0  |

|              | <i>Temperatura del aire</i><br>C° | <i>Humedad Relativa</i><br>% | <i>Velocidad del viento</i><br>m/s | <i>Presión Atmosférica</i><br>hPa | <i>Radiación Solar</i><br>W/m <sup>2</sup> |
|--------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--|
| <b>6-Mar</b> | 23.908333                         | 80.333333                    | 0.1333333                          | 1007.025                          | 0  |
|              | 23.15                             | 83.666667                    | 0                                  | 1006.4417                         | 0  |
|              | 22.825                            | 85.916667                    | 0                                  | 1005.825                          | 0  |
|              | 22.825                            | 86.416667                    | 0                                  | 1005.0083                         | 0  |
|              | 22.616667                         | 88                           | 0                                  | 1004.6583                         | 0  |
|              | 22.191667                         | 89                           | 0                                  | 1004.725                          | 0  |
|              | 22.033333                         | 89                           | 0                                  | 1005.1833                         | 8.8333333                                  |
|              | 22.666667                         | 87.833333                    | 0                                  | 1005.65                           | 90.916667                                  |
|              | 24.983333                         | 81.333333                    | 0                                  | 1005.9333                         | 244.41667                                  |
|              | 27.341667                         | 77.416667                    | 1.2                                | 1005.8                            | 412.41667                                  |
|              | 29.55                             | 70.833333                    | 2.2666667                          | 1005.4417                         | 558.75                                     |
|              | 31.175                            | 64.666667                    | 3.6                                | 1005.1583                         | 859.91667                                  |
|              | 32.375                            | 59.75                        | 4.1333333                          | 1004.575                          | 861.91667                                  |
|              | 32.663636                         | 57.818182                    | 4.3636364                          | 1003.8091                         | 753.27273                                  |
|              | 32.116667                         | 55.666667                    | 3.2                                | 1002.825                          | 686.41667                                  |
|              | 32.308333                         | 54.333333                    | 3.2                                | 1002.3833                         | 505.16667                                  |
|              | 29.991667                         | 59.083333                    | 2                                  | 1002.5583                         | 122  |
|              | 28.1                              | 63.583333                    | 1.4666667                          | 1003.5                            | 20.25                                      |
|              | 26.55                             | 70.583333                    | 1.0666667                          | 1004.55                           | 1.25                                       |
|              | 24.75                             | 80.666667                    | 2.2666667                          | 1006.1083                         | 0  |
|              | 23.883333                         | 85.25                        | 0                                  | 1006.925                          | 0  |
|              | 23.333333                         | 88                           | 0                                  | 1007.4667                         | 0  |
|              | 23.233333                         | 88.75                        | 0                                  | 1007.9583                         | 0  |
|              | 23.458333                         | 87.5                         | 0                                  | 1008.1667                         | 0  |

|               | <i>Temperatura del aire</i><br>C° | <i>Humedad Relativa</i><br>% | <i>Velocidad del viento</i><br>m/s | <i>Presión Atmosférica</i><br>hPa | <i>Radiación Solar</i><br>W/m <sup>2</sup> |
|---------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--|
| <b>10-Mar</b> | 23.1                              | 94                           | 0                                  | 1007.9                            | 0  |
|               | 22.991667                         | 94                           | 0                                  | 1006.9917                         | 0  |
|               | 22.925                            | 94                           | 0                                  | 1006.225                          | 0  |
|               | 22.825                            | 94                           | 0                                  | 1005.7                            | 0  |
|               | 22.883333                         | 94                           | 0                                  | 1005.6083                         | 0  |
|               | 23.091667                         | 94                           | 0                                  | 1005.9583                         | 0  |
|               | 23.116667                         | 94                           | 0                                  | 1006.6083                         | 5.1666667                                  |
|               | 23.45                             | 94                           | 0.1333333                          | 1007.3167                         | 53.833333                                  |
|               | 24.075                            | 92.583333                    | 0.2666667                          | 1008.075                          | 251.41667                                  |
|               | 27.166667                         | 82                           | 1.6                                | 1007.8167                         | 579  |
|               | 29.6                              | 73.181818                    | 3.0545455                          | 1007.0455                         | 602.81818                                  |
|               | 30.958333                         | 69.833333                    | 4                                  | 1006.4833                         | 843.16667                                  |
|               | 32.190909                         | 64.545455                    | 4.0727273                          | 1005.5091                         | 938.27273                                  |
|               | 33.333333                         | 60.833333                    | 3.6                                | 1004.45                           | 890.83333                                  |
|               | 33.45                             | 62.833333                    | 4.5333333                          | 1003.625                          | 772.08333                                  |
|               | 30.633333                         | 67.75                        | 5.2                                | 1003.225                          | 277.58333                                  |
|               | 28.283333                         | 73.416667                    | 3.3333333                          | 1003.675                          | 107.66667                                  |
|               | 26.916667                         | 77.583333                    | 1.6                                | 1004.7583                         | 21.25                                      |
|               | 26.291667                         | 78.916667                    | 0.2666667                          | 1005.725                          | 4.9166667                                  |
|               | 26.191667                         | 79.833333                    | 0.4                                | 1006.8                            | 0  |
|               | 25.25                             | 87.916667                    | 0.2666667                          | 1007.3667                         | 0  |
|               | 24.641667                         | 91.583333                    | 0                                  | 1008.425                          | 0  |
|               | 24.475                            | 92                           | 0                                  | 1009.3083                         | 0  |
|               | 24.483333                         | 92.416667                    | 0.4                                | 1009.2667                         | 0  |

|               | <i>Temperatura del aire</i><br>C° | <i>Humedad Relativa</i><br>% | <i>Velocidad del viento</i><br>m/s | <i>Presión Atmosférica</i><br>hPa | <i>Radiación Solar</i><br>W/m <sup>2</sup> |
|---------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--|
| <b>20-Mar</b> | 25.625                            | 85.416667                    | 0                                  | 1008.51667                        | 0  |
|               | 25.316667                         | 86.75                        | 0                                  | 1007.93333                        | 0  |
|               | 25.116667                         | 88.333333                    | 0                                  | 1007.66667                        | 0  |
|               | 25.025                            | 88.916667                    | 0                                  | 1007.675                          | 0  |
|               | 24.666667                         | 89.666667                    | 0                                  | 1007.28333                        | 0  |
|               | 24.283333                         | 88.916667                    | 0                                  | 1007.55833                        | 0  |
|               | 24.241667                         | 88.25                        | 0.13333333                         | 1007.975                          | 8.75                                       |
|               | 24.791667                         | 89.583333                    | 0                                  | 1008.45833                        | 89.166667                                  |
|               | 26.566667                         | 84.5                         | 0.93333333                         | 1009.28333                        | 270  |
|               | 29.125                            | 76.333333                    | 1.6                                | 1009.35833                        | 641.166667                                 |
|               | 31.133333                         | 68.75                        | 2.1333333                          | 1008.89167                        | 867.166667                                 |
|               | 32                                | 64.75                        | 2.6666667                          | 1008.325                          | 855.75                                     |
|               | 32.375                            | 61.833333                    | 2.4                                | 1007.3                            | 961.166667                                 |
|               | 33.041667                         | 60.083333                    | 3.0666667                          | 1006.35833                        | 989.75                                     |
|               | 32.883333                         | 59.916667                    | 3.4666667                          | 1005.35                           | 823.166667                                 |
|               | 32.316667                         | 62.5                         | 4                                  | 1004.53333                        | 640.916667                                 |
|               | 31.433333                         | 65.583333                    | 3.4666667                          | 1004.16667                        | 418.333333                                 |
|               | 30.15                             | 69.583333                    | 2.9333333                          | 1004.34167                        | 166.5                                      |
|               | 27.658333                         | 78                           | 1.7333333                          | 1004.80833                        | 9.0833333                                  |
|               | 26.3                              | 83.083333                    | 1.6                                | 1005.65833                        | 0  |
|               | 26.266667                         | 83.333333                    | 1.3333333                          | 1006.66667                        | 0  |
|               | 26.025                            | 83                           | 2.6666667                          | 1007.325                          | 0  |
|               | 25.6                              | 82.833333                    | 2.5333333                          | 1007.425                          | 0  |
|               | 25.108333                         | 84.5                         | 0.2666667                          | 1007.31667                        | 0  |



|               | <i>Temperatura del aire</i> | <i>Humedad Relativa</i> | <i>Velocidad del viento</i> | <i>Presión Atmosférica</i> | <i>Radiación Solar</i> |
|---------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|
| <b>24-Mar</b> | C°                          | %                       | m/s                         | hPa                        | W/m <sup>2</sup>       |
|               | 25.25                       | 86.75                   | 0.66666667                  | 1006.30833                 | 0                      |
|               | 25.4166667                  | 86.0833333              | 1.06666667                  | 1005.9                     | 0                      |
|               | 24.9833333                  | 86.9166667              | 0.13333333                  | 1005.50833                 | 0                      |
|               | 24.2083333                  | 88.6666667              | 0                           | 1005.125                   | 0                      |
|               | 23.45                       | 90.25                   | 0                           | 1004.825                   | 0                      |
|               | 23.175                      | 91.5833333              | 0                           | 1005.025                   | 0                      |
|               | 22.9666667                  | 92.1666667              | 0                           | 1005.60833                 | 6.91666667             |
|               | 24.1333333                  | 91.4166667              | 0                           | 1006.125                   | 86.3333333             |
|               | 27.6916667                  | 78.8333333              | 0.4                         | 1006.55833                 | 346.272727             |
|               | 29.7083333                  | 71                      | 1.46666667                  | 1006.50833                 | 374.666667             |
|               | 30.7                        | 69.5                    | 2.4                         | 1006.08333                 | 471.25                 |
|               | 30.4666667                  | 72.0833333              | 2.66666667                  | 1005.675                   | 715.916667             |
|               | 31.6416667                  | 67.3333333              | 3.46666667                  | 1004.90833                 | 812.25                 |
|               | 31.3857143                  | 67                      | 3.2                         | 1004.1                     | 531.285714             |
|               | 32.1                        | 64.25                   | 3.6                         | 1003.675                   | 815.5                  |
|               | 31.3666667                  | 65.8333333              | 3.86666667                  | 1003.31667                 | 463.333333             |
|               | 30.1333333                  | 69.5                    | 3.06666667                  | 1003.46667                 | 351.333333             |
|               | 29.1583333                  | 72.6666667              | 2.8                         | 1003.875                   | 143.583333             |
|               | 27.2833333                  | 79.6666667              | 2.26666667                  | 1004.41667                 | 12.3333333             |
|               | 26.625                      | 82.0833333              | 0.13333333                  | 1005.30833                 | 0                      |
|               | 26.175                      | 84                      | 0.66666667                  | 1005.75833                 | 0                      |
|               | 25.725                      | 85.9166667              | 0                           | 1006.1                     | 0                      |
|               | 25.5666667                  | 85.5                    | 0                           | 1006.61667                 | 0                      |
|               | 25.7166667                  | 84.25                   | 0.66666667                  | 1006.74167                 | 0                      |

|              | <i>Temperatura del aire</i> | <i>Humedad Relativa</i> | <i>Velocidad del viento</i> | <i>Presión Atmosférica</i> | <i>Radiación Solar</i> |
|--------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|
| <b>2-Abr</b> | C°                          | %                       | m/s                         | hPa                        | W/m <sup>2</sup>       |
|              | 24.6833333                  | 91                      | 0                           | 1005.2                     | 0                      |
|              | 24.35                       | 91.8333333              | 0                           | 1004.15833                 | 0                      |
|              | 24.15                       | 92.25                   | 0                           | 1003.73333                 | 0                      |
|              | 24.0571429                  | 93                      | 0                           | 1003.22857                 | 0                      |
|              | 23.7333333                  | 93.8333333              | 0                           | 1003.21667                 | 0                      |
|              | 23.4833333                  | 94                      | 0.4                         | 1003.23333                 | 0                      |
|              | 23.2916667                  | 94.8333333              | 1.33333333                  | 1003.54167                 | 22.0833333             |
|              | 24.0583333                  | 94                      | 1.46666667                  | 1003.8                     | 134.5                  |
|              | 26.0166667                  | 88.5833333              | 0.93333333                  | 1004.14167                 | 303.25                 |
|              | 28.075                      | 82                      | 0.93333333                  | 1004.26667                 | 406                    |
|              | 29.39                       | 76.9                    | 0.8                         | 1004.26                    | 596.4                  |
|              | 30.1222222                  | 75.2222222              | 2.48888889                  | 1004.26667                 | 435.111111             |
|              | 30.275                      | 75.1666667              | 2.8                         | 1003.61667                 | 583.666667             |
|              | 31.325                      | 70.9166667              | 1.86666667                  | 1002.55                    | 676                    |
|              | 32.4916667                  | 67.8333333              | 2.4                         | 1001.575                   | 749.666667             |
|              | 32.6916667                  | 66.8333333              | 1.73333333                  | 1000.83333                 | 424.833333             |
|              | 31.4083333                  | 69                      | 1.6                         | 1001                       | 263.5                  |
|              | 29.775                      | 71.8333333              | 1.73333333                  | 1001.8                     | 64.4166667             |
|              | 27.9583333                  | 78.75                   | 1.46666667                  | 1002.71667                 | 0.33333333             |
|              | 27.2083333                  | 82.75                   | 0.13333333                  | 1003.73333                 | 0                      |
|              | 26.85                       | 84.4166667              | 0.4                         | 1004.59167                 | 0                      |
|              | 26.4416667                  | 86                      | 0.13333333                  | 1005.35833                 | 0                      |
|              | 25.6833333                  | 89.0833333              | 0.13333333                  | 1005.66667                 | 0                      |
|              | 25.025                      | 90.6666667              | 0.13333333                  | 1005.55833                 | 0                      |

|       | <i>Temperatura del aire</i><br>C° | <i>Humedad Relativa</i><br>% | <i>Velocidad del viento</i><br>m/s | <i>Presión Atmosférica</i><br>hPa | <i>Radiación Solar</i><br>W/m <sup>2</sup> |
|-------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--|
| 6-Abr | 24.6833333                        | 91                           | 0                                  | 1005.2                            | 0  |
|       | 24.35                             | 91.8333333                   | 0                                  | 1004.15833                        | 0  |
|       | 24.15                             | 92.25                        | 0                                  | 1003.73333                        | 0  |
|       | 24.0571429                        | 93                           | 0                                  | 1003.22857                        | 0  |
|       | 23.7333333                        | 93.8333333                   | 0                                  | 1003.21667                        | 0  |
|       | 23.6                              | 94                           | 0                                  | 1003.5                            | 0  |
|       | 23.8833333                        | 94.9166667                   | 0                                  | 1004.09167                        | 32.0833333                                 |
|       | 24.7583333                        | 94.75                        | 0.4                                | 1004.96667                        | 130  |
|       | 26.35                             | 90.0833333                   | 1.73333333                         | 1005.6                            | 325.666667                                 |
|       | 28.3111111                        | 82.3333333                   | 1.77777778                         | 1006.11111                        | 421.666667                                 |
|       | 29.24                             | 79.2                         | 2.24                               | 1006.29                           | 489  |
|       | 30.3                              | 75.4166667                   | 2.66666667                         | 1005.6                            | 712.75                                     |
|       | 31.075                            | 72.6666667                   | 2.4                                | 1004.61667                        | 621.833333                                 |
|       | 31.3142857                        | 71.5714286                   | 2.05714286                         | 1003.22857                        | 486.714286                                 |
|       | 30.725                            | 74.25                        | 2.8                                | 1002.68333                        | 329.5                                      |
|       | 28.5333333                        | 85.1666667                   | 0.8                                | 1002.2                            | 204.916667                                 |
|       | 28.5666667                        | 81.6666667                   | 0.66666667                         | 1002.18333                        | 147.75                                     |
|       | 27.6666667                        | 82                           | 0.66666667                         | 1002.85833                        | 42   |
|       | 26.5916667                        | 87                           | 0.26666667                         | 1003.775                          | 0.08333333                                 |
|       | 25.45                             | 91.5                         | 0.8                                | 1005.58333                        | 0  |
|       | 24.65                             | 93.8333333                   | 1.2                                | 1005.475                          | 0  |
|       | 24.2818182                        | 94                           | 0.58181818                         | 1004.98182                        | 0  |
|       | 24.1                              | 94.5                         | 0                                  | 1005.025                          | 0  |
|       | 24.1                              | 95                           | 0                                  | 1005.35714                        | 0  |

|        | <i>Temperatura del aire</i><br>C° | <i>Humedad Relativa</i><br>% | <i>Velocidad del viento</i><br>m/s | <i>Presión Atmosférica</i><br>hPa | <i>Radiación Solar</i><br>W/m <sup>2</sup> |
|--------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--|
| 17-Abr | 25.3                              | 88.4166667                   | 0                                  | 1007.00833                        | 0  |
|        | 24.8                              | 90.3333333                   | 0                                  | 1006.275                          | 0  |
|        | 24.5083333                        | 91.8333333                   | 0                                  | 1005.8                            | 0  |
|        | 24.3857143                        | 92.8571429                   | 0                                  | 1005.7                            | 0  |
|        | 24.2                              | 93.8333333                   | 0                                  | 1005.725                          | 0  |
|        | 24.325                            | 94                           | 0                                  | 1005.70833                        | 0  |
|        | 24.4                              | 94                           | 0                                  | 1005.95                           | 4.33333333                                 |
|        | 24.625                            | 93.8333333                   | 0.26666667                         | 1006.41667                        | 51.75                                      |
|        | 25.2166667                        | 90.8333333                   | 1.06666667                         | 1007.025                          | 169.083333                                 |
|        | 26.6333333                        | 85.5833333                   | 1.6                                | 1007.275                          | 343.416667                                 |
|        | 28.0666667                        | 78.8333333                   | 1.46666667                         | 1007.45                           | 396.083333                                 |
|        | 28.9                              | 76.0833333                   | 1.6                                | 1006.85833                        | 462.333333                                 |
|        | 30.3583333                        | 69.5833333                   | 2                                  | 1005.88333                        | 765.666667                                 |
|        | 31.2916667                        | 66.3333333                   | 2.53333333                         | 1004.675                          | 706.083333                                 |
|        | 31.9083333                        | 63.9166667                   | 1.46666667                         | 1003.74167                        | 572.916667                                 |
|        | 31.5666667                        | 68                           | 2.26666667                         | 1003.225                          | 453.666667                                 |
|        | 30.325                            | 71                           | 1.86666667                         | 1002.95                           | 233.583333                                 |
|        | 28.8416667                        | 74.75                        | 0.53333333                         | 1003.025                          | 70.5                                       |
|        | 27.15                             | 76.75                        | 1.2                                | 1003.56667                        | 2.83333333                                 |
|        | 26.025                            | 78.6666667                   | 0.13333333                         | 1004.3                            | 0  |
|        | 25.6666667                        | 79.25                        | 0.26666667                         | 1005.025                          | 0  |
|        | 25.6583333                        | 79.6666667                   | 0.8                                | 1005.33333                        | 0  |
|        | 25.2416667                        | 80.4166667                   | 0.93333333                         | 1005.34167                        | 0  |
|        | 24.45                             | 84                           | 0.13333333                         | 1005.45                           | 0  |

|               | <i>Temperatura del aire</i> | <i>Humedad Relativa</i> | <i>Velocidad del viento</i> | <i>Presión Atmosférica</i> | <i>Radiación Solar</i> |
|---------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|
| <b>21-Abr</b> | C°                          | %                       | m/s                         | hPa                        | W/m <sup>2</sup>       |
|               | 23.6555556                  | 84.6666667              | 0                           | 1006.95556                 | 0                      |
|               | 23.5916667                  | 87                      | 0                           | 1006.475                   | 0                      |
|               | 23.3333333                  | 88.3333333              | 0                           | 1005.95833                 | 0                      |
|               | 23.3083333                  | 88                      | 0                           | 1005.8                     | 0                      |
|               | 23.1833333                  | 89.1666667              | 0                           | 1005.925                   | 0                      |
|               | 22.9333333                  | 90.9166667              | 0                           | 1005.975                   | 0                      |
|               | 22.85                       | 91.3333333              | 0                           | 1006.50833                 | 10.8333333             |
|               | 23.725                      | 89.25                   | 0                           | 1007.16667                 | 97.0833333             |
|               | 25.2583333                  | 84.8333333              | 1.3333333                   | 1007.28333                 | 247.833333             |
|               | 27.3083333                  | 79.3333333              | 3.0666667                   | 1007.58333                 | 516.666667             |
|               | 28.3666667                  | 75.8333333              | 2.2666667                   | 1007.375                   | 409.25                 |
|               | 29.87                       | 71.6                    | 2.88                        | 1006.65                    | 914.9                  |
|               | 31.0083333                  | 68.8333333              | 3.6                         | 1005.71667                 | 1028.25                |
|               | 31.3083333                  | 68.5                    | 2.6666667                   | 1004.73333                 | 484.583333             |
|               | 29.9083333                  | 71                      | 2.1333333                   | 1004.16667                 | 173.166667             |
|               | 28.6666667                  | 71.9166667              | 1.4666667                   | 1003.825                   | 158.25                 |
|               | 28.2916667                  | 71.5                    | 1.4666667                   | 1003.575                   | 85.8333333             |
|               | 27.05                       | 72.6666667              | 0.9333333                   | 1003.8                     | 34.75                  |
|               | 25.6666667                  | 74.1666667              | 0.6666667                   | 1004.50833                 | 1.16666667             |
|               | 24.9083333                  | 77.1666667              | 0                           | 1005.35                    | 0                      |
|               | 24.775                      | 78.8333333              | 0                           | 1005.98333                 | 0                      |
|               | 24.9                        | 78.8333333              | 0                           | 1006.38333                 | 0                      |
|               | 25.0714286                  | 80.2857143              | 0                           | 1006.57143                 | 0                      |
|               | 24.8666667                  | 81.5                    | 0                           | 1006.59167                 | 0                      |

|              | <i>Temperatura del aire</i> | <i>Humedad Relativa</i> | <i>Velocidad del viento</i> | <i>Presión Atmosférica</i> | <i>Radiación Solar</i> |
|--------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|
| <b>7-May</b> | C°                          | %                       | m/s                         | hPa                        | W/m <sup>2</sup>       |
|              | 23.0333333                  | 87.5833333              | 0                           | 1004.95833                 | 0                      |
|              | 22.625                      | 88.5833333              | 0                           | 1004.53333                 | 0                      |
|              | 22.2                        | 89.8333333              | 0.1333333                   | 1003.975                   | 0                      |
|              | 22.3125                     | 89.75                   | 0.2                         | 1003.6                     | 0                      |
|              | 22.1090909                  | 90.4545455              | 0                           | 1003.69091                 | 0                      |
|              | 21.9083333                  | 91.1666667              | 0                           | 1004                       | 0                      |
|              | 21.95                       | 91                      | 0                           | 1004.45                    | 0                      |
|              | 22.875                      | 90.1666667              | 0.2666667                   | 1005.64167                 | 96.5                   |
|              | 25.4166667                  | 82.0833333              | 0.9333333                   | 1006.125                   | 309.833333             |
|              | 28.6833333                  | 71                      | 1.7333333                   | 1006.34167                 | 613.583333             |
|              | 30.6166667                  | 65.25                   | 2.6666667                   | 1006.09167                 | 760.916667             |
|              | 31.2083333                  | 63.8333333              | 2.8                         | 1005.46667                 | 637.916667             |
|              | 32.0333333                  | 63.3333333              | 2.9333333                   | 1004.625                   | 810.5                  |
|              | 32.6583333                  | 61.5                    | 3.2                         | 1003.625                   | 843                    |
|              | 31.7416667                  | 63.8333333              | 4                           | 1002.75                    | 734                    |
|              | 30.25                       | 67.25                   | 3.8666667                   | 1002.31667                 | 428.666667             |
|              | 29.2                        | 69.9166667              | 3.4666667                   | 1002.36667                 | 293.666667             |
|              | 27.5833333                  | 74.5833333              | 2.1333333                   | 1002.74167                 | 80.6666667             |
|              | 25.8                        | 79.5                    | 0.8                         | 1003.28333                 | 1.41666667             |
|              | 25.125                      | 81.5833333              | 1.6                         | 1003.76667                 | 0                      |
|              | 24.85                       | 82.6666667              | 2.6666667                   | 1004.025                   | 0                      |
|              | 24.6083333                  | 83.4166667              | 2.1333333                   | 1004.5                     | 0                      |
|              | 24.2916667                  | 84.4166667              | 2.8                         | 1004.8                     | 0                      |
|              | 24.0666667                  | 86                      | 1.4666667                   | 1004.95                    | 0                      |

|               | <i>Temperatura<br/>del aire</i> | <i>Humedad<br/>Relativa</i> | <i>Velocidad<br/>del viento</i> | <i>Presión<br/>Atmosférica</i> | <i>Radiación<br/>Solar</i> |
|---------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| <b>11-May</b> | C°                              | %                           | m/s                             | hPa                            | W/m <sup>2</sup>           |
|               | 23.9583333                      | 81.9166667                  | 0.13333333                      | 1006.825                       | 0                          |
|               | 23.4333333                      | 83.25                       | 0                               | 1006.39167                     | 0                          |
|               | 23.1166667                      | 84.9166667                  | 0                               | 1005.79167                     | 0                          |
|               | 22.4083333                      | 86.8333333                  | 0                               | 1005.675                       | 0                          |
|               | 22.1333333                      | 87.9166667                  | 0                               | 1005.65833                     | 0                          |
|               | 21.825                          | 88.5                        | 0                               | 1005.86667                     | 0                          |
|               | 21.2916667                      | 90.25                       | 0                               | 1006.125                       | 14.05                      |
|               | 21.75                           | 90.875                      | 0                               | 1006.575                       | 166.866667                 |
|               | 24.9090909                      | 80.7272727                  | 1.16363636                      | 1007.36364                     | 342.266667                 |
|               | 27.45                           | 71.8333333                  | 3.2                             | 1007.375                       | 574.666667                 |
|               | 29.1833333                      | 67                          | 2.93333333                      | 1006.98333                     | 689.316667                 |
|               | 30.5916667                      | 64                          | 3.33333333                      | 1006.25833                     | 615.133333                 |
|               | 31.4666667                      | 62.25                       | 4                               | 1005.18333                     | 744.366667                 |
|               | 31.5833333                      | 61.9166667                  | 4.93333333                      | 1004.15833                     | 600.316667                 |
|               | 31.5583333                      | 61.9166667                  | 4.4                             | 1003.41667                     | 612.383333                 |
|               | 30.5416667                      | 64.5833333                  | 4                               | 1002.93333                     | 460.033333                 |
|               | 29.9583333                      | 66                          | 3.86666667                      | 1003.05833                     | 194.283333                 |
|               | 27.8833333                      | 71.5                        | 2.13333333                      | 1003.89167                     | 32.2                       |
|               | 25.9                            | 77.1666667                  | 2.26666667                      | 1004.59167                     | 1.26666667                 |
|               | 24.7083333                      | 81.25                       | 0.66666667                      | 1005.375                       | 0                          |
|               | 24.1833333                      | 83.5                        | 0.13333333                      | 1006.05                        | 0                          |
|               | 23.7916667                      | 85.25                       | 0.53333333                      | 1006.93333                     | 0                          |
|               | 23.275                          | 87                          | 0                               | 1007.00833                     | 0                          |
|               | 22.825                          | 88.25                       | 0.13333333                      | 1006.8                         | 0                          |
|               | <i>Temperatura<br/>del aire</i> | <i>Humedad<br/>Relativa</i> | <i>Velocidad<br/>del viento</i> | <i>Presión<br/>Atmosférica</i> | <i>Radiación<br/>Solar</i> |
| <b>31-May</b> | C°                              | %                           | m/s                             | hPa                            | W/m <sup>2</sup>           |
|               | 22.89166667                     | 83.628333                   | 0.5061667                       | 1009                           | 0                          |
|               | 22.745                          | 84.1                        | 0.4838333                       | 1008.1167                      | 0                          |
|               | 22.36333333                     | 84.733333                   | 0.9598333                       | 1008                           | 0                          |
|               | 22.50166667                     | 85.035                      | 1.3778333                       | 1007.2333                      | 0                          |
|               | 22.42833333                     | 85.518333                   | 1.2906667                       | 1007.8                         | 0                          |
|               | 22.36166667                     | 84.6                        | 1.2065                          | 1008                           | 0                          |
|               | 22.20666667                     | 87.431667                   | 0.4718333                       | 1008                           | 4.3                        |
|               | 22.82459016                     | 83.822951                   | 0.8147541                       | 1008.0656                      | 62.245902                  |
|               | 23.42666667                     | 82.545                      | 0.9213333                       | 1008                           | 216.58333                  |
|               | 24.44166667                     | 77.656667                   | 0.8735                          | 1008                           | 359.63333                  |
|               | 26.33666667                     | 71.391667                   | 1.2536667                       | 1008                           | 710.43333                  |
|               | 27.50166667                     | 66.991667                   | 2.1133333                       | 1007.9667                      | 638.83333                  |
|               | 27.915                          | 64.74                       | 2.753                           | 1007.0333                      | 683.93333                  |
|               | 27.39166667                     | 66.503333                   | 2.809                           | 1006.8                         | 435.08333                  |
|               | 27.75333333                     | 65.695                      | 3.293                           | 1005.9833                      | 679.71667                  |
|               | 26.34166667                     | 70.963333                   | 3.7745                          | 1006                           | 300.38333                  |
|               | 25.18166667                     | 76.028333                   | 4.3405                          | 1006.0167                      | 277                        |
|               | 24.36                           | 78.335                      | 3.9451667                       | 1006.8167                      | 86.7                       |
|               | 23.85                           | 78.521667                   | 3.3351667                       | 1007.75                        | 1.4166667                  |
|               | 23.66333333                     | 78.118333                   | 2.5298333                       | 1008                           | 0                          |
|               | 23.16                           | 79.181667                   | 1.3433333                       | 1008.4667                      | 0                          |
|               | 23.045                          | 342.67333                   | 1.2213333                       | 1242                           | 0                          |
|               | 22.59833333                     | 82.163333                   | 1.081                           | 1009                           | 0                          |
|               | 22.84666667                     | 82.971667                   | 0.779                           | 1009                           | 0                          |

|       | <i>Temperatura<br/>del aire</i><br>C° | <i>Humedad<br/>Relativa</i><br>% | <i>Velocidad<br/>del viento</i><br>m/s | <i>Presión<br/>Atmosférica</i><br>hPa | <i>Radiación<br/>Solar</i><br>W/m <sup>2</sup> |
|-------|---------------------------------------|----------------------------------|--|---------------------------------------|--|
| 2-Jun | 23.1833333                            | 85.416667                        | 0.85                                   | 1010.9167                             | 0  |
|       | 22.8416667                            | 86.166667                        | 0.925                                  | 1011.025                              | 0  |
|       | 22.65                                 | 86.166667                        | 0.95                                   | 1011                                  | 0  |
|       | 22.25                                 | 87.75                            | 0.8166667                              | 1010.6333                             | 0  |
|       | 22.6083333                            | 86.833333                        | 0.8083333                              | 1010.65                               | 0  |
|       | 22.8                                  | 86                               | 0.375                                  | 1010.95                               | 0  |
|       | 22.8833333                            | 86                               | 0.1                                    | 1011.325                              | 6.7  |
|       | 22.8333333                            | 86.5                             | 0.1666667                              | 1011.6667                             | 144.78333                                      |
|       | 23.0083333                            | 87                               | 0                                      | 1012.2167                             | 174.2  |
|       | 23.575                                | 85.916667                        | 0.0333333                              | 1012.6667                             | 289.95   |
|       | 24.4916667                            | 80.75                            | 0.2                                    | 1012.825                              | 356.25   |
|       | 25.2083333                            | 77                               | 0.3916667                              | 1012.8417                             | 484.1  |
|       | 25.5083333                            | 75.666667                        | 0.525                                  | 1012.5667                             | 304.54545                                      |
|       | 25.8083333                            | 73.916667                        | 0.5666667                              | 1011.8667                             | 300.08333                                      |
|       | 25.7416667                            | 73.166667                        | 0.5666667                              | 1011.2167                             | 275.71667                                      |
|       | 25.9833333                            | 71.666667                        | 0.8833333                              | 1010.3833                             | 250.38333                                      |
|       | 25.75                                 | 72.333333                        | 1.1333333                              | 1009.8                                | 220  |
|       | 25.3416667                            | 73.583333                        | 1.0333333                              | 1009.8417                             | 35   |
|       | 24.6583333                            | 76                               | 0.9916667                              | 1010.0417                             | 2.8166667                                      |
|       | 24.0083333                            | 78.416667                        | 0.65                                   | 1010.3583                             | 0  |
|       | 23.6833333                            | 81.25                            | 0.5333333                              | 1010.8917                             | 0  |
|       | 23.4416667                            | 82.416667                        | 0.4                                    | 1011.4                                | 0  |
|       | 23.3916667                            | 83.75                            | 0.1                                    | 1011.9167                             | 0  |
|       | 23.3                                  | 83.75                            | 0                                      | 1012.0583                             | 0  |

**Anexo 5: Información de  $\text{Cos}\theta$ , distancia relativa entre la tierra y el sol (Dr), y temperatura del aire en cada instante de los vuelos del UAV**

| Fecha   | hora  | $\text{Cos}\theta$ | Dr     | Ta (°C) |
|---------|-------|--------------------|--------|---------|
| 11 Feb. | 14:35 | 0.8590             | 1.0247 | 27.990  |
| 06 Mar. | 11:20 | 0.9528             | 1.0144 | 28.550  |
| 10 Mar. | 11:25 | 0.9598             | 1.0123 | 26.600  |
| 20 Mar. | 12:10 | 0.9920             | 1.0069 | 29.650  |
| 24 Mar. | 11:20 | 0.9506             | 1.0047 | 29.400  |
| 02 Abr. | 10:50 | 0.9007             | 0.9996 | 28.600  |
| 06 Abr. | 09:10 | 0.6492             | 0.9973 | 26.500  |
| 17 Abr. | 11:05 | 0.9070             | 0.9912 | 27.200  |
| 21 Abr. | 09:15 | 0.6559             | 0.9890 | 25.400  |
| 07 May. | 10:10 | 0.7787             | 0.9809 | 27.200  |
| 11 May. | 10:30 | 0.8120             | 0.9791 | 27.100  |
| 31 May. | 11:00 | 0.8269             | 0.9717 | 27.300  |
| 02 Jun. | 12:55 | 0.8630             | 0.9712 | 27.500  |

**Anexo 6: Evapotranspiración de referencia ( $\text{ET}_0$ ) calculada de las 24 horas de los 13 días de vuelos en campo**

| d. juliano 42 |    |             | d. juliano 65 |      |           |              |
|---------------|----|-------------|---------------|------|-----------|--------------|
| 11-Feb        |    |             | 6-Mar         |      |           |              |
| Date          |    | ET portatil | Date          | Time | ET Agpres | ET calibrado |
| 11/02/2023    | 24 | 0.026       | 6/03/2023     | 24   | 0.012     | 0.027        |
| 11/02/2023    | 1  | 0.025       | 6/03/2023     | 1    | 0.010     | 0.025        |
| 11/02/2023    | 2  | 0.027       | 6/03/2023     | 2    | 0.010     | 0.025        |
| 11/02/2023    | 3  | 0.021       | 6/03/2023     | 3    | 0.010     | 0.025        |
| 11/02/2023    | 4  | 0.015       | 6/03/2023     | 4    | 0.010     | 0.025        |
| 11/02/2023    | 5  | 0.015       | 6/03/2023     | 5    | 0.010     | 0.025        |
| 11/02/2023    | 6  | 0.031       | 6/03/2023     | 6    | 0.019     | 0.032        |
| 11/02/2023    | 7  | 0.075       | 6/03/2023     | 7    | 0.068     | 0.067        |
| 11/02/2023    | 8  | 0.150       | 6/03/2023     | 8    | 0.174     | 0.145        |
| 11/02/2023    | 9  | 0.225       | 6/03/2023     | 9    | 0.310     | 0.244        |
| 11/02/2023    | 10 | 0.320       | 6/03/2023     | 10   | 0.442     | 0.341        |
| 11/02/2023    | 11 | 0.333       | 6/03/2023     | 11   | 0.678     | 0.513        |
| 11/02/2023    | 12 | 0.351       | 6/03/2023     | 12   | 0.716     | 0.540        |
| 11/02/2023    | 13 | 0.615       | 6/03/2023     | 13   | 0.659     | 0.499        |
| 11/02/2023    | 14 | 0.422       | 6/03/2023     | 14   | 0.590     | 0.449        |
| 11/02/2023    | 15 | 0.291       | 6/03/2023     | 15   | 0.471     | 0.362        |
| 11/02/2023    | 16 | 0.225       | 6/03/2023     | 16   | 0.170     | 0.142        |
| 11/02/2023    | 17 | 0.151       | 6/03/2023     | 17   | 0.079     | 0.076        |
| 11/02/2023    | 18 | 0.059       | 6/03/2023     | 18   | 0.035     | 0.044        |
| 11/02/2023    | 19 | 0.050       | 6/03/2023     | 19   | 0.035     | 0.044        |
| 11/02/2023    | 20 | 0.038       | 6/03/2023     | 20   | 0.010     | 0.025        |
| 11/02/2023    | 21 | 0.032       | 6/03/2023     | 21   | 0.010     | 0.025        |
| 11/02/2023    | 22 | 0.027       | 6/03/2023     | 22   | 0.010     | 0.025        |
| 11/02/2023    | 23 | 0.021       | 7/03/2023     | 23   | 0.010     | 0.025        |
| SUMA          |    | 3.545       | SUMA          |      |           | 3.751        |



| d. juliano 69 |      |           |              |
|---------------|------|-----------|--------------|
| 10-Mar        |      |           |              |
| Date          | Time | ET Agpres | ET calibrado |
| 10/03/2023    | 24   | 0.009     | 0.025        |
| 10/03/2023    | 1    | 0.009     | 0.025        |
| 10/03/2023    | 2    | 0.009     | 0.025        |
| 10/03/2023    | 3    | 0.009     | 0.025        |
| 10/03/2023    | 4    | 0.009     | 0.025        |
| 10/03/2023    | 5    | 0.009     | 0.025        |
| 10/03/2023    | 6    | 0.017     | 0.031        |
| 10/03/2023    | 7    | 0.047     | 0.053        |
| 10/03/2023    | 8    | 0.176     | 0.147        |
| 10/03/2023    | 9    | 0.411     | 0.318        |
| 10/03/2023    | 10   | 0.470     | 0.361        |
| 10/03/2023    | 11   | 0.650     | 0.492        |
| 10/03/2023    | 12   | 0.744     | 0.561        |
| 10/03/2023    | 13   | 0.735     | 0.554        |
| 10/03/2023    | 14   | 0.658     | 0.498        |
| 10/03/2023    | 15   | 0.318     | 0.250        |
| 10/03/2023    | 16   | 0.153     | 0.130        |
| 10/03/2023    | 17   | 0.058     | 0.060        |
| 10/03/2023    | 18   | 0.015     | 0.029        |
| 10/03/2023    | 19   | 0.017     | 0.030        |
| 10/03/2023    | 20   | 0.012     | 0.027        |
| 10/03/2023    | 21   | 0.009     | 0.024        |
| 10/03/2023    | 22   | 0.009     | 0.024        |
| 11/03/2023    | 23   | 0.011     | 0.026        |
| SUMA          |      |           | 3.762        |

| d. juliano 79 |      |           |              |
|---------------|------|-----------|--------------|
| 20-Mar        |      |           |              |
| Date          | Time | ET Agpres | ET calibrado |
| 20/03/2023    | 24   | 0.009     | 0.025        |
| 20/03/2023    | 1    | 0.009     | 0.025        |
| 20/03/2023    | 2    | 0.009     | 0.025        |
| 20/03/2023    | 3    | 0.009     | 0.025        |
| 20/03/2023    | 4    | 0.009     | 0.025        |
| 20/03/2023    | 5    | 0.009     | 0.025        |
| 20/03/2023    | 6    | 0.020     | 0.033        |
| 20/03/2023    | 7    | 0.069     | 0.068        |
| 20/03/2023    | 8    | 0.200     | 0.164        |
| 20/03/2023    | 9    | 0.474     | 0.364        |
| 20/03/2023    | 10   | 0.663     | 0.501        |
| 20/03/2023    | 11   | 0.679     | 0.513        |
| 20/03/2023    | 12   | 0.757     | 0.571        |
| 20/03/2023    | 13   | 0.790     | 0.595        |
| 20/03/2023    | 14   | 0.676     | 0.512        |
| 20/03/2023    | 15   | 0.542     | 0.414        |
| 20/03/2023    | 16   | 0.361     | 0.281        |
| 20/03/2023    | 17   | 0.149     | 0.127        |
| 20/03/2023    | 18   | 0.037     | 0.045        |
| 20/03/2023    | 19   | 0.027     | 0.038        |
| 20/03/2023    | 20   | 0.025     | 0.036        |
| 20/03/2023    | 21   | 0.035     | 0.043        |
| 20/03/2023    | 22   | 0.034     | 0.043        |
| 21/03/2023    | 23   | 0.013     | 0.027        |
| SUMA          |      |           | 4.523        |

| d. juliano 83 |      |           |              |
|---------------|------|-----------|--------------|
| 24-Mar        |      |           |              |
| Date          | Time | ET Agpres | ET calibrado |
| 24/03/2023    | 24   | 0.016     | 0.030        |
| 24/03/2023    | 1    | 0.019     | 0.032        |
| 24/03/2023    | 2    | 0.011     | 0.026        |
| 24/03/2023    | 3    | 0.009     | 0.025        |
| 24/03/2023    | 4    | 0.009     | 0.025        |
| 24/03/2023    | 5    | 0.009     | 0.025        |
| 24/03/2023    | 6    | 0.018     | 0.031        |
| 24/03/2023    | 7    | 0.066     | 0.067        |
| 24/03/2023    | 8    | 0.253     | 0.203        |
| 24/03/2023    | 9    | 0.308     | 0.243        |
| 24/03/2023    | 10   | 0.398     | 0.308        |
| 24/03/2023    | 11   | 0.554     | 0.422        |
| 24/03/2023    | 12   | 0.645     | 0.488        |
| 24/03/2023    | 13   | 0.588     | 0.447        |
| 24/03/2023    | 14   | 0.651     | 0.493        |
| 24/03/2023    | 15   | 0.414     | 0.320        |
| 24/03/2023    | 16   | 0.296     | 0.234        |
| 24/03/2023    | 17   | 0.124     | 0.109        |
| 24/03/2023    | 18   | 0.040     | 0.047        |
| 24/03/2023    | 19   | 0.011     | 0.026        |
| 24/03/2023    | 20   | 0.018     | 0.031        |
| 24/03/2023    | 21   | 0.009     | 0.025        |
| 24/03/2023    | 22   | 0.009     | 0.025        |
| 25/03/2023    | 23   | 0.017     | 0.031        |
| SUMA          |      |           | 3.712        |

| d. juliano 92 |      |           |              |
|---------------|------|-----------|--------------|
| 2-Abr         |      |           |              |
| Date          | Time | ET Agpres | ET calibrado |
| 2/04/2023     | 24   | 0.009     | 0.025        |
| 2/04/2023     | 1    | 0.009     | 0.025        |
| 2/04/2023     | 2    | 0.009     | 0.025        |
| 2/04/2023     | 3    | 0.009     | 0.025        |
| 2/04/2023     | 4    | 0.009     | 0.025        |
| 2/04/2023     | 5    | 0.010     | 0.026        |
| 2/04/2023     | 6    | 0.027     | 0.038        |
| 2/04/2023     | 7    | 0.094     | 0.087        |
| 2/04/2023     | 8    | 0.216     | 0.176        |
| 2/04/2023     | 9    | 0.305     | 0.240        |
| 2/04/2023     | 10   | 0.451     | 0.347        |
| 2/04/2023     | 11   | 0.420     | 0.324        |
| 2/04/2023     | 12   | 0.459     | 0.353        |
| 2/04/2023     | 13   | 0.531     | 0.405        |
| 2/04/2023     | 14   | 0.594     | 0.451        |
| 2/04/2023     | 15   | 0.358     | 0.280        |
| 2/04/2023     | 16   | 0.223     | 0.181        |
| 2/04/2023     | 17   | 0.077     | 0.074        |
| 2/04/2023     | 18   | 0.032     | 0.042        |
| 2/04/2023     | 19   | 0.011     | 0.026        |
| 2/04/2023     | 20   | 0.014     | 0.028        |
| 2/04/2023     | 21   | 0.010     | 0.026        |
| 2/04/2023     | 22   | 0.010     | 0.025        |
| 2/04/2023     | 23   | 0.010     | 0.025        |
| 3/04/2023     | 23   | 0.010     | 0.025        |
| SUMA          |      |           | 3.277        |

| d. juliano 96 |      |           |              |
|---------------|------|-----------|--------------|
| 6-Abr         |      |           |              |
| Date          | Time | ET Agpres | ET calibrado |
| 6/04/2023     | 24   | 0.009     | 0.025        |
| 6/04/2023     | 1    | 0.009     | 0.025        |
| 6/04/2023     | 2    | 0.009     | 0.025        |
| 6/04/2023     | 3    | 0.009     | 0.025        |
| 6/04/2023     | 4    | 0.009     | 0.025        |
| 6/04/2023     | 5    | 0.009     | 0.025        |
| 6/04/2023     | 6    | 0.025     | 0.037        |
| 6/04/2023     | 7    | 0.093     | 0.086        |
| 6/04/2023     | 8    | 0.228     | 0.184        |
| 6/04/2023     | 9    | 0.317     | 0.249        |
| 6/04/2023     | 10   | 0.377     | 0.293        |
| 6/04/2023     | 11   | 0.542     | 0.414        |
| 6/04/2023     | 12   | 0.495     | 0.379        |
| 6/04/2023     | 13   | 0.403     | 0.312        |
| 6/04/2023     | 14   | 0.295     | 0.233        |
| 6/04/2023     | 15   | 0.162     | 0.136        |
| 6/04/2023     | 16   | 0.116     | 0.103        |
| 6/04/2023     | 17   | 0.034     | 0.043        |
| 6/04/2023     | 18   | 0.012     | 0.026        |
| 6/04/2023     | 19   | 0.013     | 0.028        |
| 6/04/2023     | 20   | 0.012     | 0.027        |
| 6/04/2023     | 21   | 0.011     | 0.026        |
| 6/04/2023     | 22   | 0.009     | 0.024        |
| 7/04/2023     | 23   | 0.009     | 0.024        |
| SUMA          |      |           | 2.772        |

| d. juliano 107 |      |           |              |
|----------------|------|-----------|--------------|
| 17-Abr         |      |           |              |
| Date           | Time | ET Agpres | ET calibrado |
| 17/04/2023     | 24   | 0.009     | 0.025        |
| 17/04/2023     | 1    | 0.009     | 0.025        |
| 17/04/2023     | 2    | 0.009     | 0.025        |
| 17/04/2023     | 3    | 0.009     | 0.024        |
| 17/04/2023     | 4    | 0.009     | 0.024        |
| 17/04/2023     | 5    | 0.009     | 0.024        |
| 17/04/2023     | 6    | 0.017     | 0.030        |
| 17/04/2023     | 7    | 0.047     | 0.052        |
| 17/04/2023     | 8    | 0.128     | 0.111        |
| 17/04/2023     | 9    | 0.253     | 0.203        |
| 17/04/2023     | 10   | 0.306     | 0.242        |
| 17/04/2023     | 11   | 0.361     | 0.282        |
| 17/04/2023     | 12   | 0.586     | 0.445        |
| 17/04/2023     | 13   | 0.562     | 0.428        |
| 17/04/2023     | 14   | 0.460     | 0.354        |
| 17/04/2023     | 15   | 0.374     | 0.291        |
| 17/04/2023     | 16   | 0.200     | 0.164        |
| 17/04/2023     | 17   | 0.027     | 0.038        |
| 17/04/2023     | 18   | 0.031     | 0.041        |
| 17/04/2023     | 19   | 0.012     | 0.027        |
| 17/04/2023     | 20   | 0.015     | 0.029        |
| 17/04/2023     | 21   | 0.022     | 0.034        |
| 17/04/2023     | 22   | 0.023     | 0.035        |
| 18/04/2023     | 23   | 0.011     | 0.026        |
| SUMA           |      |           | 2.979        |

| d. juliano 111 |      |           |              |
|----------------|------|-----------|--------------|
| 21-Abr         |      |           |              |
| Date           | Time | ET Agpres | ET calibrado |
| 21/04/2023     | 24   | 0.010     | 0.025        |
| 21/04/2023     | 1    | 0.010     | 0.025        |
| 21/04/2023     | 2    | 0.010     | 0.025        |
| 21/04/2023     | 3    | 0.010     | 0.025        |
| 21/04/2023     | 4    | 0.009     | 0.025        |
| 21/04/2023     | 5    | 0.009     | 0.025        |
| 21/04/2023     | 6    | 0.020     | 0.032        |
| 21/04/2023     | 7    | 0.072     | 0.071        |
| 21/04/2023     | 8    | 0.183     | 0.151        |
| 21/04/2023     | 9    | 0.375     | 0.292        |
| 21/04/2023     | 10   | 0.327     | 0.256        |
| 21/04/2023     | 11   | 0.673     | 0.509        |
| 21/04/2023     | 12   | 0.765     | 0.576        |
| 21/04/2023     | 13   | 0.414     | 0.320        |
| 21/04/2023     | 14   | 0.188     | 0.155        |
| 21/04/2023     | 15   | 0.155     | 0.131        |
| 21/04/2023     | 16   | 0.104     | 0.094        |
| 21/04/2023     | 17   | 0.035     | 0.043        |
| 21/04/2023     | 18   | 0.025     | 0.036        |
| 21/04/2023     | 19   | 0.010     | 0.026        |
| 21/04/2023     | 20   | 0.010     | 0.026        |
| 21/04/2023     | 21   | 0.010     | 0.025        |
| 21/04/2023     | 22   | 0.010     | 0.025        |
| 22/04/2023     | 23   | 0.010     | 0.025        |
| SUMA           |      |           | 2.945        |

| d. juliano 127 |      |           |              |
|----------------|------|-----------|--------------|
| 7-May          |      |           |              |
| Date           | Time | ET Agpres | ET calibrado |
| 7/05/2023      | 24   | 0.010     | 0.025        |
| 7/05/2023      | 1    | 0.010     | 0.025        |
| 7/05/2023      | 2    | 0.011     | 0.026        |
| 7/05/2023      | 3    | 0.011     | 0.026        |
| 7/05/2023      | 4    | 0.010     | 0.025        |
| 7/05/2023      | 5    | 0.010     | 0.025        |
| 7/05/2023      | 6    | 0.017     | 0.031        |
| 7/05/2023      | 7    | 0.072     | 0.070        |
| 7/05/2023      | 8    | 0.220     | 0.179        |
| 7/05/2023      | 9    | 0.456     | 0.350        |
| 7/05/2023      | 10   | 0.592     | 0.450        |
| 7/05/2023      | 11   | 0.527     | 0.402        |
| 7/05/2023      | 12   | 0.649     | 0.492        |
| 7/05/2023      | 13   | 0.680     | 0.514        |
| 7/05/2023      | 14   | 0.593     | 0.450        |
| 7/05/2023      | 15   | 0.372     | 0.289        |
| 7/05/2023      | 16   | 0.250     | 0.200        |
| 7/05/2023      | 17   | 0.018     | 0.031        |
| 7/05/2023      | 18   | 0.023     | 0.035        |
| 7/05/2023      | 19   | 0.029     | 0.039        |
| 7/05/2023      | 20   | 0.034     | 0.043        |
| 7/05/2023      | 21   | 0.030     | 0.040        |
| 7/05/2023      | 22   | 0.031     | 0.041        |
| 7/05/2023      | 23   | 0.022     | 0.034        |
| SUMA           |      |           | 3.844        |

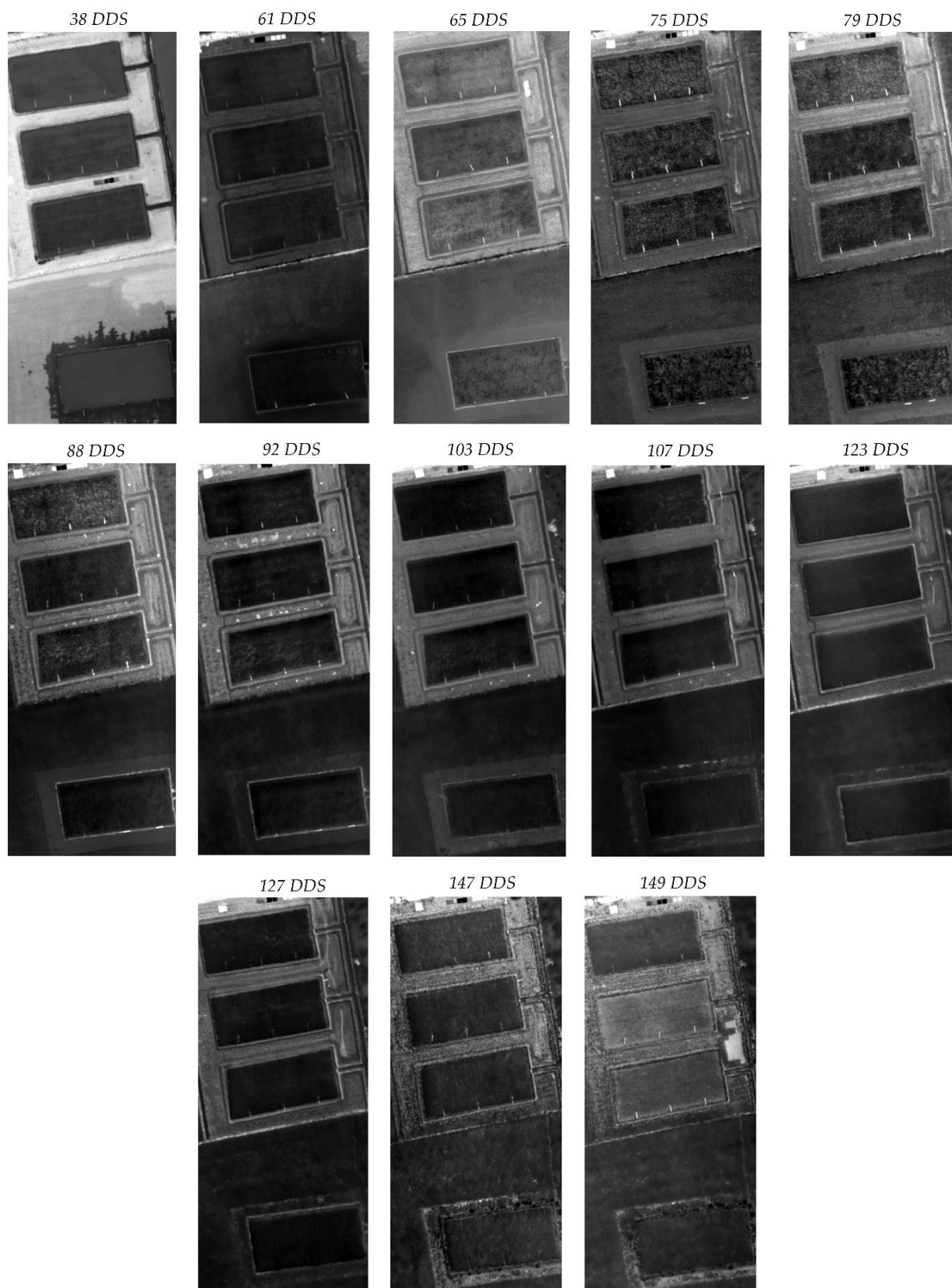


| d. juliano 131 |      |             |
|----------------|------|-------------|
| 11-May         |      |             |
| Date           | Time | ET portatil |
| 11/05/2023     | 24   | 0.013       |
| 11/05/2023     | 1    | 0.012       |
| 11/05/2023     | 2    | 0.011       |
| 11/05/2023     | 3    | 0.010       |
| 11/05/2023     | 4    | 0.011       |
| 11/05/2023     | 5    | 0.011       |
| 11/05/2023     | 6    | 0.022       |
| 11/05/2023     | 7    | 0.108       |
| 11/05/2023     | 8    | 0.235       |
| 11/05/2023     | 9    | 0.402       |
| 11/05/2023     | 10   | 0.496       |
| 11/05/2023     | 11   | 0.457       |
| 11/05/2023     | 12   | 0.543       |
| 11/05/2023     | 13   | 0.450       |
| 11/05/2023     | 14   | 0.447       |
| 11/05/2023     | 15   | 0.341       |
| 11/05/2023     | 16   | 0.179       |
| 11/05/2023     | 17   | 0.065       |
| 11/05/2023     | 18   | 0.035       |
| 11/05/2023     | 19   | 0.030       |
| 11/05/2023     | 20   | 0.021       |
| 11/05/2023     | 21   | 0.028       |
| 11/05/2023     | 22   | 0.022       |
| 11/05/2023     | 23   | 0.020       |
| SUMA           |      | 3.968       |

| d. juliano 151 |      |             |
|----------------|------|-------------|
| 31-May         |      |             |
| Date           | Time | ET Portatil |
| 31/05/2023     | 24   | 0.016       |
| 31/05/2023     | 1    | 0.016       |
| 31/05/2023     | 2    | 0.019       |
| 31/05/2023     | 3    | 0.022       |
| 31/05/2023     | 4    | 0.021       |
| 31/05/2023     | 5    | 0.021       |
| 31/05/2023     | 6    | 0.023       |
| 31/05/2023     | 7    | 0.060       |
| 31/05/2023     | 8    | 0.156       |
| 31/05/2023     | 9    | 0.255       |
| 31/05/2023     | 10   | 0.498       |
| 31/05/2023     | 11   | 0.476       |
| 31/05/2023     | 12   | 0.516       |
| 31/05/2023     | 13   | 0.358       |
| 31/05/2023     | 14   | 0.498       |
| 31/05/2023     | 15   | 0.260       |
| 31/05/2023     | 16   | 0.205       |
| 31/05/2023     | 17   | 0.004       |
| 31/05/2023     | 18   | 0.044       |
| 31/05/2023     | 19   | 0.040       |
| 31/05/2023     | 20   | 0.028       |
| 31/05/2023     | 21   | 0.000       |
| 31/05/2023     | 22   | 0.023       |
| 31/05/2023     | 23   | 0.019       |
| SUMA           |      | 3.580       |

| d. juliano 153 |      |           |              |
|----------------|------|-----------|--------------|
| 2-Jun          |      |           |              |
| Date           | Time | ET Agpres | ET calibrado |
| 2/06/2023      | 24   | 0.018     | 0.031        |
| 2/06/2023      | 1    | 0.018     | 0.031        |
| 2/06/2023      | 2    | 0.018     | 0.031        |
| 2/06/2023      | 3    | 0.016     | 0.030        |
| 2/06/2023      | 4    | 0.017     | 0.030        |
| 2/06/2023      | 5    | 0.014     | 0.028        |
| 2/06/2023      | 6    | 0.020     | 0.033        |
| 2/06/2023      | 7    | 0.095     | 0.087        |
| 2/06/2023      | 8    | 0.123     | 0.108        |
| 2/06/2023      | 9    | 0.203     | 0.166        |
| 2/06/2023      | 10   | 0.253     | 0.203        |
| 2/06/2023      | 11   | 0.343     | 0.269        |
| 2/06/2023      | 12   | 0.229     | 0.185        |
| 2/06/2023      | 13   | 0.226     | 0.183        |
| 2/06/2023      | 14   | 0.206     | 0.168        |
| 2/06/2023      | 15   | 0.187     | 0.155        |
| 2/06/2023      | 16   | 0.148     | 0.126        |
| 2/06/2023      | 17   | 0.006     | 0.022        |
| 2/06/2023      | 18   | 0.028     | 0.039        |
| 2/06/2023      | 19   | 0.021     | 0.033        |
| 2/06/2023      | 20   | 0.018     | 0.031        |
| 2/06/2023      | 21   | 0.016     | 0.029        |
| 2/06/2023      | 22   | 0.011     | 0.026        |
| 2/06/2023      | 23   | 0.010     | 0.025        |
| SUMA           |      |           | 2.071        |

## Anexo 7: Imágenes térmicas corregidas en °C



**Anexo 8: Selección del píxel frío y caliente con valores de NDVI, albedo, temperatura y las constantes de calibración “a y b” de la Molina**

| Fecha  | DDS | Píxel    | Coordenada (WGS84, UTM) |            | NDVI | IAF  | Albedo | T(K)   | Constantes de calibración |         |
|--------|-----|----------|-------------------------|------------|------|------|--------|--------|---------------------------|---------|
|        |     |          | X                       | Y          |      |      |        |        | a                         | b       |
| 26-Ene | 76  | Frío     | 288199.55               | 8664041.99 | 0.88 | 1.85 | 0.21   | 298.31 | 0.189                     | -55.001 |
|        |     | Caliente | 288201.83               | 8664033.69 | 0.09 | 0.19 | 0.24   | 314.03 |                           |         |
| 13-Feb | 94  | Frío     | 288199.17               | 8664040.77 | 0.93 | 2.18 | 0.29   | 295.52 | 0.095                     | -25.480 |
|        |     | Caliente | 288197.79               | 8664046.11 | 0.14 | 0.22 | 0.28   | 333.94 |                           |         |
| 20-Feb | 101 | Frío     | 288199.19               | 8664040.79 | 0.89 | 1.95 | 0.23   | 300.69 | 0.074                     | -20.590 |
|        |     | Caliente | 288197.57               | 8664044.61 | 0.12 | 0.21 | 0.23   | 336.52 |                           |         |
| 27-Feb | 108 | Frío     | 288205.17               | 8664036.87 | 0.89 | 1.93 | 0.31   | 297.83 | 0.111                     | -28.634 |
|        |     | Caliente | 288197.51               | 8664037.71 | 0.11 | 0.20 | 0.28   | 316.64 |                           |         |
| 16-Mar | 125 | Frío     | 288204.31               | 8664042.46 | 0.92 | 2.11 | 0.33   | 298.30 | 0.192                     | -56.741 |
|        |     | Caliente | 288196.39               | 8664043.54 | 0.11 | 0.20 | 0.23   | 318.66 |                           |         |
| 27-Mar | 136 | Frío     | 288203.51               | 8664042.08 | 0.87 | 1.83 | 0.34   | 299.15 | 0.136                     | -39.974 |
|        |     | Caliente | 288196.57               | 8664043.70 | 0.10 | 0.20 | 0.21   | 330.50 |                           |         |
| 11-Abr | 151 | Frío     | 288204.37               | 8664042.44 | 0.78 | 1.40 | 0.23   | 301.44 | 0.051                     | -12.791 |
|        |     | Caliente | 288197.99               | 8664034.60 | 0.12 | 0.21 | 0.32   | 328.75 |                           |         |

**Anexo 9: Resumen de resultados de los componentes del balance energético, ETc y otros resultados, según su la fenológica del cultivo para la Molina**

| Detalle   | Fase vegetativa |                | Fase reproductiva |                |                |                | Fase de maduración |
|-----------|-----------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|
|           | 76 DDS          | 94 DDS         | 101 DDS           | 108 DDS        | 125 DDS        | 136 DDS        | 151 DDS            |
| <b>P1</b> |                 |                |                   |                |                |                |                    |
| Albedo    | 0,17 ± 0,02     | 0,25 ± 0,02    | 0,22 ± 0,02       | 0,29 ± 0,02    | 0,28 ± 0,03    | 0,28 ± 0,02    | 0,24 ± 0,02        |
| Térmica   | 27,07 ± 0,74    | 23,42 ± 0,73   | 28,51 ± 1,08      | 25,01 ± 0,77   | 26,87 ± 0,77   | 29,89 ± 1,13   | 31,11 ± 1,31       |
| NDVI      | 0,72 ± 0,11     | 0,89 ± 0,04    | 0,85 ± 0,03       | 0,86 ± 0,03    | 0,90 ± 0,01    | 0,83 ± 0,02    | 0,70 ± 0,03        |
| IAF       | 1,25 ± 0,36     | 1,92 ± 0,16    | 1,75 ± 0,14       | 1,79 ± 0,12    | 1,97 ± 0,08    | 1,64 ± 0,12    | 1,13 ± 0,10        |
| Rn        | 771,64 ± 22,14  | 714,34 ± 25,76 | 712,26 ± 18,17    | 660,78 ± 22,01 | 578,49 ± 29,03 | 520,97 ± 18,23 | 595,93 ± 16,13     |
| G         | 74,08 ± 16,30   | 37,11 ± 7,39   | 52,33 ± 7,65      | 44,15 ± 6,15   | 33,10 ± 4,21   | 48,01 ± 5,77   | 78,32 ± 6,05       |
| H         | 271,62 ± 25,93  | 119,97 ± 1,94  | 195,06 ± 5,48     | 196,67 ± 3,08  | 70,53 ± 12,91  | 71,13 ± 9,51   | 213,88 ± 3,85      |
| LE        | 425,95 ± 31,38  | 557,26 ± 22,57 | 464,87 ± 16,85    | 419,96 ± 20,15 | 474,86 ± 33,47 | 401,83 ± 21,53 | 303,72 ± 20,73     |
| ETc       | 4,85 ± 0,36     | 4,86 ± 0,20    | 4,92 ± 0,18       | 7,21 ± 0,35    | 4,22 ± 0,30    | 4,18 ± 0,22    | 2,20 ± 0,15        |
| <b>P2</b> |                 |                |                   |                |                |                |                    |
| Albedo    | 0,16 ± 0,02     | 0,25 ± 0,03    | 0,22 ± 0,02       | 0,29 ± 0,02    | 0,29 ± 0,03    | 0,28 ± 0,02    | 0,24 ± 0,02        |
| Térmica   | 27,03 ± 0,75    | 24,34 ± 1,61   | 28,38 ± 0,67      | 25,94 ± 1,05   | 26,72 ± 0,71   | 29,35 ± 1,21   | 31,87 ± 1,10       |
| NDVI      | 0,69 ± 0,09     | 0,88 ± 0,03    | 0,85 ± 0,03       | 0,85 ± 0,04    | 0,90 ± 0,01    | 0,85 ± 0,02    | 0,72 ± 0,03        |
| IAF       | 1,11 ± 0,28     | 1,90 ± 0,17    | 1,70 ± 0,15       | 1,73 ± 0,16    | 1,96 ± 0,07    | 1,73 ± 0,09    | 1,19 ± 0,13        |
| Rn        | 787,17 ± 22,60  | 711,83 ± 31,01 | 710,18 ± 23,75    | 655,15 ± 25,87 | 570,54 ± 24,95 | 519,53 ± 18,45 | 593,77 ± 14,66     |
| G         | 80,29 ± 11,82   | 39,36 ± 8,51   | 54,32 ± 7,96      | 48,49 ± 7,78   | 33,42 ± 3,48   | 43,61 ± 4,32   | 76,75 ± 6,61       |
| H         | 282,98 ± 23,27  | 123,22 ± 3,12  | 193,73 ± 3,36     | 199,67 ± 3,35  | 67,98 ± 11,93  | 66,90 ± 10,42  | 217,84 ± 3,91      |
| LE        | 423,90 ± 36,91  | 549,25 ± 25,88 | 462,13 ± 18,87    | 406,98 ± 24,94 | 469,14 ± 28,04 | 409,02 ± 25,29 | 299,18 ± 17,07     |
| ETc       | 4,83 ± 0,42     | 4,79 ± 0,23    | 4,89 ± 0,20       | 6,99 ± 0,43    | 4,17 ± 0,25    | 4,25 ± 0,26    | 2,17 ± 0,12        |
| <b>P3</b> |                 |                |                   |                |                |                |                    |
| Albedo    | 0,18 ± 0,02     | 0,26 ± 0,03    | 0,22 ± 0,02       | 0,28 ± 0,03    | 0,29 ± 0,03    | 0,28 ± 0,02    | 0,24 ± 0,02        |
| Térmica   | 27,39 ± 0,90    | 23,07 ± 0,86   | 28,01 ± 0,40      | 26,80 ± 0,55   | 27,20 ± 0,80   | 28,73 ± 1,30   | 31,84 ± 1,10       |
| NDVI      | 0,73 ± 0,12     | 0,90 ± 0,02    | 0,85 ± 0,03       | 0,87 ± 0,03    | 0,89 ± 0,01    | 0,83 ± 0,02    | 0,66 ± 0,03        |
| IAF       | 1,29 ± 0,37     | 1,97 ± 0,13    | 1,74 ± 0,13       | 1,82 ± 0,14    | 1,92 ± 0,09    | 1,62 ± 0,11    | 1,01 ± 0,09        |
| Rn        | 756,20 ± 21,43  | 705,67 ± 26,81 | 712,51 ± 20,15    | 652,60 ± 32,04 | 564,35 ± 27,29 | 522,86 ± 20,36 | 590,57 ± 18,99     |
| G         | 72,59 ± 17,02   | 34,57 ± 7,05   | 51,70 ± 6,85      | 45,30 ± 7,97   | 35,67 ± 4,90   | 47,59 ± 5,63   | 84,53 ± 4,46       |
| H         | 286,78 ± 24,76  | 119,03 ± 3,16  | 191,52 ± 3,25     | 204,92 ± 3,49  | 75,86 ± 13,26  | 61,01 ± 11,04  | 213,91 ± 4,03      |
| LE        | 396,83 ± 29,31  | 552,07 ± 23,83 | 469,29 ± 17,14    | 402,37 ± 28,59 | 452,83 ± 26,90 | 414,26 ± 24,54 | 292,13 ± 21,15     |
| ETc       | 4,52 ± 0,33     | 4,81 ± 0,21    | 4,96 ± 0,18       | 6,92 ± 0,49    | 4,03 ± 0,24    | 4,30 ± 0,25    | 2,12 ± 0,15        |



**Anexo 10: Variación espacial de Rn en fase vegetativa (76 a 94 DDS), reproductiva (101 a 136 DDS) y maduración (151 DDS) del cultivo de arroz para La Molina**





**Anexo 11: Variación espacial de H en fase vegetativa (76 a 94 DDS), reproductiva (101 a 136 DDS) y maduración (151 DDS) del cultivo de arroz para La Molina**





**Anexo 12: Variación espacial de G en fase vegetativa (76 a 94 DDS), reproductiva (101 a 136 DDS) y maduración (151 DDS) del cultivo de arroz para La Molina**





**Anexo 13: Variación espacial del LE en fase vegetativa (76 a 94 DDS), reproductiva (101 a 136 DDS) y maduración (151 DDS) del cultivo de arroz para La Molina**





**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**DEPARTAMENTO DE RECURSOS HIDRICOS DRH**  
**LABORATORIO DE AGUA, SUELO MEDIO AMBIENTE, FERTIRRIEGO**

Av. La Molina s/n teléf.: 614 7800 anexo 226 / 349 3969 E mail: las-fia@lamolina.edu.pe



**Nº 019385**

**ANÁLISIS DE SUELO - CARACTERIZACIÓN**

**SOLICITANTE** : ROXANA SARA PEÑA AMARO  
**PROYECTO** : EVAPOTRANSPIRACIÓN ESTIMADA POR BALANCE DE ENERGÍA USANDO INFORMACIÓN REMOTA Y RIEGO CON ALTERNANCIA DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO EN ARROZALES, CHICLAYO  
**UBICACIÓN** : Lambaqueye, provincia Chiclayo  
**RESP. ANÁLISIS** : Ing. Elizabeth Monterrey Porras  
**FECHA DE ANÁLISIS** : La Molina, 12 de abril de 2023

| Número de muestra |                          | CE<br>dS m <sup>-1</sup><br>Relación 1:1 | Análisis Mecánico |           |              |                  | pH<br>Relación 1:1 | M.O.<br>% | P<br>ppm | K<br>ppm | CaCO <sub>3</sub><br>% | Cationes Cambiables       |                  |                  |                 |                |                                  |
|-------------------|--------------------------|--|-------------------|-----------|--------------|------------------|--------------------|-----------|----------|----------|------------------------|---------------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|----------------------------------|
| Lab.              | Campo                    |  | Arena<br>%        | Limo<br>% | Arcilla<br>% | Textura          |                    |           |          |          |                        | CIC total                 | Ca <sup>++</sup> | Mg <sup>++</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Al <sup>3+</sup> +H <sup>+</sup> |
|                   |                          |  |                   |           |              |                  |                    |           |          |          |                        | Cmol (+) Kg <sup>-1</sup> |                  |                  |                 |                |                                  |
| 19385             | Inia vista florida<br>C1 | 2.70                                     | 31.68             | 34.00     | 34.32        | Franco arcilloso | 7.67               | 2.91      | 55.64    | 1377.40  | 27.09                  | 18.79                     | 12.76            | 2.01             | 0.15            | 0.85           | -                                |

LABORATORIO DE ANALISIS DE AGUA Y SUELO

*Rocio Pastor Jauregui*  
 Dra. Rocio Pastor Jauregui  
 JEFA DE LABORATORIO





## MÉTODOS SEGUIDOS EN EL ANÁLISIS

### CARACTERIZACIÓN COMPLETA

- Análisis mecánico: textura por método Hidrómetro
- Conductividad eléctrica: C.E. Lectura de extracto de relación suelo-agua 1:1 y extracto de la pasta saturada
- pH: lectura de extracto de relación suelo- agua 1: 1 y extracto de la pasta saturada
- Calcáreo total: método gaso- volumétrico
- Materia orgánica: método de Walkley y Black. % M.O = % C x 1.724
- Nitrógeno total: método Micro Kjeldahl
- Fósforo: método de Olsen Modificado, extracto.  $\text{NaHCO}_3$  0,5M, pH= 8,5
- Potasio disponible: extracto acetato de amonio 1N, pH 7,0
- Capacidad de intercambio catiónico: acetato de amonio 1N pH 7,0
- Cambiables: determinado en extracto amónico  
 $\text{Ca}^{2+}$ : espectrofotometría de absorción atómica  
 $\text{Mg}^{2+}$ : espectrofotometría de absorción atómica  
 $\text{K}^+$ : espectrofotometría de absorción atómica  
 $\text{Na}^+$ : espectrofotometría de absorción atómica

### SALINIDAD y SODICIDAD (1 :3)

#### 1. Cationes solubles

- $\text{Ca}^{2+}$ : espectrofotometría de absorción atómica  
 $\text{Mg}^{2+}$ : espectrofotometría de absorción atómica  
 $\text{K}^+$ : espectrofotometría de absorción atómica  
 $\text{Na}^+$ : espectrofotometría de absorción atómica

#### 2. Aniones solubles

- $\text{Cl}^-$ : volumétrico: nitrato de plata  
 $\text{CO}_3^{2-}$ : volumétrico: ácido clorhídrico  
 $\text{HCO}_3^-$ : volumétrico: ácido clorhídrico  
 $\text{SO}_4^{2-}$ : turbidimétrico: sulfato de bario  
 $\text{NO}_3^-$ : colorimétrico

- Yeso soluble: solubilización con agua y precipitación con acetona
- Boro soluble: colorimétrico: método de la curcumina

### INTERPRETACIÓN Disponibles

| C.E. (Sales)<br>( $\text{dS m}^{-1}$ ) |                        |
|--|------------------------|
| < 2                                    | Muy ligeramente salino |
| 2 - 4                                  | Ligeramente salino     |
| 4 - 8                                  | Moderadamente salino   |
| 8 - 16                                 | Fuertemente salino     |
| > 16                                   | Extremadamente salino  |

\*Según respuesta de los cultivos

| Clase | Materia Orgánica | Calcáreo Total<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Fósforo<br>P (ppm) | Potasio<br>K (ppm) |
|-------|------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|
| Bajo  | < 2%             | < 1%                                  | < 7                | < 100              |
| Medio | 2 - 4%           | 1- 5%                                 | 7-14               | 100 - 240          |
| Alto  | > 4%             | > 5%                                  | > 14               | > 240              |

#### EQUIVALENCIAS

1 mmhos/cm = 1  $\text{dS m}^{-1}$

1 meq/100gr = 1  $\text{cmol}(+) \text{Kg}^{-1}$

| CIC efectiva<br>$\text{cmol}(+) \text{Kg}^{-1}$ |          |
|---|----------|
| 2 - 5   | muy baja |
| 5 - 10  | baja     |
| 10 - 15   | media    |
| 15 - 20   | alta     |
| > 20  | muy alta |

\* CIC: Capacidad de intercambiable de cationes

| CIC total<br>$\text{cmol}(+) \text{Kg}^{-1}$ |            |
|--|------------|
| 0 - 10                                       | muy baja   |
| 10 - 20                                      | baja       |
| 20 - 35                                      | media      |
| 35 - 45                                      | media-alta |
| > 45   | alta       |

| Reacción del Suelo (pH) |                        |
|-------------------------|------------------------|
| 5,1 - 5,5               | Fuertemente ácido      |
| 5,6 - 6,0               | Moderadamente ácido    |
| 6,6 - 7,3               | Neutro                 |
| 7,4 - 7,8               | Ligeramente alcalino   |
| 7,9 - 8,4               | Moderadamente alcalino |