

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



**“EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE ARROZ MEDIANTE
LA APLICACIÓN DE LOS MODELOS SEBAL Y METRIC USANDO
IMÁGENES MULTIESPECTRALES”**

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

DAVID JUNIOR QUISPE TITO

LIMA – PERÚ

2021

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA

**“EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE ARROZ MEDIANTE
LA APLICACIÓN DE LOS MODELOS SEBAL Y METRIC USANDO
IMÁGENES MULTIESPECTRALES”**

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

Presentado por:

BACH. DAVID JUNIOR QUISPE TITO

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Dr. NÉSTOR MONTALVO ARQUÍÑIGO
Presidente

Dra. LÍA RAMOS FERNÁNDEZ
Asesor

Dr. DAVID RICARDO ASCENCIOS TEMPLO
Miembro

Mestre. JORGE LUIS DÍAZ RIMARACHIN
Miembro

Ing. JOSÉ BERNARDINO ARAPA QUISPE
Co-Asesor

LIMA – PERU

2021

DEDICATORIA

A mis padres Uriel Quispe Choque y Marina Tito Cárdenas, que me apoyaron incondicionalmente en la parte moral y económica, y por su amor infinito.

A mis hermanos Dante, Gladys y Milagros que me inspiran a través de sus propios logros.

A mis abuelos Salvador, Emilia, Valentín que aún me dan amor y consejos de cómo vivir feliz y a mi abuela Leonarda que desde siempre y ahora en el cielo me enseña a no rendirme.

A mis amigos por toda las vivencias y compañías durante la etapa universitaria.

AGRADECIMIENTO

Al Proyecto “Uso de sensores remotos para determinar índice de estrés hídrico en el mejoramiento del manejo de riego de arroz (Orayza Sativa) en zonas áridas, para enfrentar al cambio climático”. Convenio N° 008-2016-INIA-PNIA/UPMSI/IE.

Al Vicerrectorado de Investigación por permitirme ser uno de los ganadores del “IX CONCURSO DE SUBVENCIÓN DE TESIS DE PREGRADO UNALM 2019”.
A mi asesora Dra. Lía Ramos Fernandez, por el apoyo y seguimiento en cada etapa de la investigación y al grupo de investigación DANI “Teledetección y cambio climático aplicado a los recursos hídricos y la agricultura” por el apoyo brindado.
Al Mg. Sc. Javier Quille Mamani, a la Ing. Lisette Altamirano Gutierrez y al Ing. William Salazar Coronel por compartir sus conocimientos, consejos y amistad.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	OBJETIVOS.....	2
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1.	BALANCE DE ENERGÍA PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE.....	3
2.1.1.	Relación entre NDVI y Ts para la selección de píxeles calientes y fríos.....	6
2.2.	BALANCE DE ENERGÍA PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN A PARTIR DE IMÁGENES DE RPA.....	7
2.2.1.	Aplicación de SEBAL con imágenes de RPA	10
2.3.	ESTIMACIÓN DE LA ET DEL CULTIVO DE ARROZ A PARTIR DE IMÁGENES DEL SATÉLITE MODIS Y LANDSAT	11
2.4.	CULTIVO DE ARROZ EN EL PERÚ	17
III.	METODOLOGÍA	19
3.1.	ZONA DE ESTUDIO	19
3.2.	MATERIALES Y EQUIPOS	20
3.3.	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	21
3.4.	PROCEDIMIENTO	24
3.4.1.	Índices de vegetación (NDVI, IAF), albedo y temperatura superficial (Ts)..	24
3.4.2.	Componentes del balance de energía	26
3.4.3.	Evapotranspiración del cultivo.....	29
IV.	RESULTADOS Y DISCUSION	32
4.1.	ÍNDICES DE VEGETACION (NDVI, IAF) y ALBEDO.....	32
4.1.1.	Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).....	32
4.1.2.	Índice de área foliar (IAF).....	33
4.1.3.	Albedo	35
4.1.4.	Temperatura superficial (Ts).....	35
4.2.	COMPONENTES DEL BALANCE DE ENERGÍA	37
4.2.1.	Radiación neta (Rn).....	37
4.2.2.	Flujo de calor de suelo (G).....	37
4.2.3.	Flujo sensible del aire (H)	39
4.2.4.	Flujo de calor latente (LE)	42
4.3.	EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO (ETc)	44

V. CONCLUSIONES.....	55
VI. RECOMENDACIONES.....	56
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	57
VIII. ANEXOS	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Estadísticas agrarias de arroz cáscara en el Perú.....	17
Tabla 2: Materiales, equipos y herramientas.	20
Tabla 3: Selección del píxel frío y caliente en cada vuelo de RPA para los valores de NDVI, albedo, temperatura y las constantes de calibrado.	40
Tabla 4: Valores (\bar{x}) de NDVI, IAF ALBEDO, RN, G, H, LE, ETc según variedad y experimento.....	49
Tabla 5: Valores de ETc en el cultivo de arroz segun diversos investigadores.....	54
Tabla 6: Análisis de varianza (ANOVA) según el ETc por tratamiento en E1	66
Tabla 7: Análisis de varianza (ANOVA) según el ETc por tratamiento en E2.....	66
Tabla 8: Análisis de varianza y Prueba de duncan ($p=0.05$) según el ETc del análisis combinado de los experimentos.....	66
Tabla 9: Agua aplicada, rendimiento y eficiencia de uso de agua por experimento y tratamientos.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de flujo del algoritmo de equilibrio de energía de la superficie de la tierra (SEBAL).....	3
Figura 2: Histogramas de NDVI y Ts utilizados para la detección automatizada de los píxeles frío y caliente.	7
Figura 3: Diagramas de dispersión que comparan la ET obtenida con SEBAL y obtenida a partir de información de la torre de flujo en arrozales: con radiación extraterrestre (a) y radiación solar (b).....	12
Figura 4: Variación temporal de la ET obtenido con SEBAL (simulado) y la torre de flujo (observado) en arrozales.....	12
Figura 5: Comparación de los datos mensuales del NDVI (a), albedo (b), ET de torre de flujo (c) y ET de SEBAL (d) en un arrozal (CFK) y un bosque (SMK, DMK).	13
Figura 6: Variación espacial de la ETc en arrozales del valle de KOU en Burkina Faso (África), en época seca del 2013 y 2014.	14
Figura 7: Distribución espacial de la ETrel en todo el sistema de irrigación del valle de Kou en Burkina Faso (África), durante la etapa de producción de la estación seca en 2013 y 2014.	15
Figura 8: Variación de la evapotranspiración relativa para el cultivo de arroz de enero a abril del 2013 y 2014 en el valle de Kou en Burkina Faso (África).	15
Figura 9: Principales departamentos productores de Arroz cáscara en 2018	18
Figura 10: Ubicación del experimento de arroz, en el Área Experimental de Riego - UNALM.	19
Figura 11: Diseño experimental.	23
Figura 12: Medición de la radiación par con el ceptometro.	25
Figura 13: Procedimiento secuencial para estimar la evapotranspiración del cultivo por balance de energía.....	31
Figura 14: Relación entre el NDVI obtenido a partir de imágenes multiespectrales de RPA y el sensor Green Seeker	32
Figura 15: Distribución espacial del NDVI en el cultivo de arroz según DDS en la campaña agrícola 2019 en la Molina.	33
Figura 16: Relación del NDVI obtenido de RPA e IAF medido con un ceptometro.....	34
Figura 17: Distribución espacial del IAF en el cultivo de arroz según DDS en la	

campaña agrícola 2019 en la Molina.	34
Figura 18: Distribución espacial de albedo en el cultivo de arroz según DDS en la campaña agrícola 2019 en la Molina.	35
Figura 19: Diagrama de dispersión de la temperatura de imagen térmica (°C) y la temperatura del termopar (°C).....	36
Figura 20: Distribución espacial de la temperatura superficial (Ts) según DDS en la campaña agrícola 2019 en la Molina.	36
Figura 21: Distribución espacial de la radiación neta (Rn) del balance de energía en el modelo METRIC en el cultivo de arroz.....	37
Figura 22: Distribución espacial del flujo del Calor del Suelo (G) del balance de energía en el modelo SEBAL en el cultivo de arroz.	38
Figura 23: Distribución espacial del flujo del Calor del Suelo (G) del balance de energía en el modelo METRIC en el cultivo de arroz.	39
Figura 24: Variación de la diferencia de la temperatura cerca de la superficie (dt) para la estimación del coeficiente a y b en la selección del pixel frío y caliente en el cálculo de flujo de calor del aire (H).....	39
Figura 25: Ubicación del pixel promedio frío (a) y caliente (b) en la imagen RGB, Ts, NDVI, Albedo y IAF, durante la fase de macollamiento del cultivo de arroz (70 DDS).....	41
Figura 26: Distribución espacial del flujo del calor sensible del aire (H) del balance de energía en el modelo SEBAL en el cultivo de arroz.....	41
Figura 27: Distribución espacial del flujo del calor sensible del aire (H) del balance de energía en el modelo METRIC en el cultivo de arroz.	42
Figura 28: Distribución espacial del flujo del calor latente (LE) del balance de energía en el modelo SEBAL en el cultivo de arroz.	43
Figura 29: Distribución espacial del flujo del calor latente (LE) del balance de energía en el modelo METRIC en el cultivo de arroz.	44
Figura 30: Distribución espacial de la evapotranspiración de cultivo (ETc) obtenida por balance de energía del modelo SEBAL en el cultivo de arroz.....	45
Figura 31: Distribución espacial de la evapotranspiración de cultivo (ETc) obtenida por balance de energía del modelo METRIC en el cultivo de arroz.	46
Figura 32: Nivel de significancia estadística para la ETc (mm d-1), a) análisis por experimento; b) análisis por variedades en el experimento 1; d) análisis por variedades en el experimento 2.....	46

Figura 33: Evapotranspiración obtenida por el método METRIC y SEBAL.....	48
Figura 34: Evapotranspiración del cultivo (ETc) del cultivo de arroz. (a) y humedad del suelo de todo el desarrollo del cultivo (b).....	50
Figura 35: Evapotranspiración de referencia (ETo) estimada a partir de métodos indirectos (Jensen-Haise, Hargreaves-Samani, Penman-Monteih, Prestley y Taylor y Turc), de agosto 2018 a mayo 2019, en La Molina (Lima).....	51
Figura 36: ETo estimada por métodos indirectos (a), ETc estimada con el modelo METRIC y diversos autores (b) y relación entre ETc del modelo METRIC y ETo de métodos indirectos (c) en la molina (Lima). * ubicación según el autor de la tabla 6.	53
Figura 37: Preparación del terreno y monitoreo del cultivo.....	60
Figura 38: Toma de datos de la RPA para fotografías multiespectrales, toma de datos del Green Seaker para NDVI (imagen inferior izquierda) y del Ceptometro Accupar para IAF (imagen inferior derecha).....	61
Figura 39: Cámara multiespectral Parrot Sequoia , diana de calibración de al reflectancia y Cámara térmica FLIR.....	61
Figura 40: Análisis de suelo.	62
Figura 41: Análisis del agua de riego proveniente del reservorio del Área Experimental de Riego (AER).....	63
Figura 42: Análisis del agua de riego proveniente del reservorio de la Unidad de Riego de la UNALM.	64
Figura 43: Evapotranspiración del cultivo (ETc) en en tres variedades de arroz IR43, IR71706 y Sahood Ulan 12 en E1 (panel superior) y E2 (panel central) y la variación de humedad del suelo (panel inferior).....	65

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: PANEL FOTOGRÁFICO	60
ANEXO 2: ANÁLISIS DE AGUA Y SUELO	62
ANEXO 3: ETC del ARROZ Y HUMEDAD DEL SUELO	65
ANEXO 4: ANÁLISIS ESTADÍSTICO	66
ANEXO 5: AGUA APLICADA Y RENDIMIENTO DEL CULTIVO	67

ABREVIATURAS

AA	Aprendizaje automático
α	Albedo de la superficie
Λ	Fracción Evaporativa
λ	Calor latente
ANN	Redes neuronales artificiales
DTD	Diferencia de temperatura dual
dT	Diferencia de temperatura del aire
EC	Edy Covarianza
E1	Experimento con humedad de suelo a saturación
E2	Experimento con humedad de suelo entre saturación y capacidad de campo
ϵ_0	Emisividad térmica superficial
ϵ_a	Emisividad atmosférica
ET	Evapotranspiración
ET _o	Evapotranspiración de referencia
ET _c	Evapotranspiración real o del cultivo
ET _{rel}	Relación entre ET _c /ET _o o llamado coeficiente del cultivo K _c
ET _{o-24}	Evapotranspiración de referencia diaria
ET _{inst}	Evapotranspiración instantánea
ET _{oF}	Fracción de ET de referencia
G	Flujo de calor del suelo
G _{o24}	Flujo de calor el suelo diario
G _{sc}	Constante solar
GCPs	Puntos de control terrestre común
H	Flujo de calor sensible
H _r	Humedad relativa
IAF	Índice de área foliar
LE	Flujo de calor latente
pp	Precipitación
L_{atm}^{\downarrow}	Resplandor del cielo hemisférico descendente
L_{atm}^{\uparrow}	Irradiancia hemisférica ascendente
METRIC	Mapeo de la evapotranspiración a alta resolución con calibración internalizada
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
R _n	Radiación neta
R _{s↓}	Radiación de onda corta entrante
R _{L↓}	Radiación de onda larga entrante
R _{L↑}	Radiación de onda larga saliente
R _{n24}	Radiación neta diaria
R _{a24}	Insolación diaria
r _{ah}	Resistencia aerodinámica
SEBAL	Algoritmo de balance de energía superficial para tierra
T	Temperatura

T_a	Temperatura del aire
TSEB	Balance de energía de dos fuentes
τ_{sw}	Transmisividad
τ	Transmisividad atmosférica
u^*	Velocidad de fricción
u_{200}	Velocidad del viento a una altura de mezcla de 200 m
u	Velocidad del viento
RPA	Aeronave pilotada remotamente
z_1 y z_2	Alturas por encima del desplazamiento de la vegetación en el plano cero
z_{om}	Longitud de la rugosidad del momento

RESUMEN

La estimación de la evapotranspiración con teledetección, se inició con apoyo de imágenes satelitales, sin embargo, el avance tecnológico, está permitiendo incorporar nuevas plataformas de obtención de imágenes, como las imágenes obtenidas con aeronaves pilotadas remotamente RPA, que permiten mejorar la resolución temporal y espacial de las imágenes, por ello que se realizó el presente trabajo de investigación, en el aérea experimental de riego de la UNALM, cuyo objetivo fue estimar la evapotranspiración del cultivo de arroz en tres variedades, V1: IR43, V2: IR71706 y V3: Sahood Ulan 12, aplicando el modelo *Surface Energy balance Algorithms for Land: SEBAL* ; y el modelo *Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration METRIC*, a partir de la captura de imágenes de cámaras multispectrales y cámaras térmicas, montadas en RPA tipo multirotor de clase cuadricóptero, realizando un total 9 vuelos; asimismo se realizó una correlación de índices de vegetación diferencial normalizado NDVI e índice de área foliar IAF, con dos sensores de mano: Green Seaker y Ceptómetro y una calibración de temperatura con termopares instaladas en el dosel del cultivo, en condiciones de humedad de suelo a saturación constante (E1) y entre saturación y capacidad de campo (E2); del que se obtuvo valores de media de ETc de 2.27 mm d⁻¹ para E1 y 1.73 para E2 con el modelo SEBAL y 2.27 mm d⁻¹ para E1 y 1.73 para E2 con el modelo METRIC, durante la fase de macollamiento del cultivo; se realizó la prueba ANOVA con $p \leq 0.05$, no habiendo diferencia significativa entre tratamientos del mismo experimento, pero si entre experimentos.

Palabras claves: Cultivo de Arroz, evapotranspiración, balance de energía, RPA, SEBAL, METRIC.

ABSTRACT

The estimation of evapotranspiration with remote sensing began with the support of satellite images, however, technological progress is allowing the incorporation of new imaging platforms, such as images obtained with remotely piloted RPA aircraft, which allow improving the temporal resolution and This is why the present research work was carried out in the experimental irrigation area of UNALM, whose objective was to estimate the evapotranspiration of the rice crop in three varieties, V1: IR43, V2: IR71706 and V3: Sahood Ulan 12, applying the model Surface energy balance algorithms for the earth: SEBAL; and the Mapping EvapoTranspiration model at high Resolution with Internalized Calibration METRIC, from the capture of images from multispectral cameras and thermal cameras, mounted on quadcopter-class multirotor RPA, performing a total of 9 flights; A correlation of normalized differential vegetation indices NDVI and IAF leaf area index was performed with two hand sensors: Green Seaker and Ceptometer and a temperature calibration with thermocouples installed in the crop canopy, under saturated soil moisture conditions. constant (E1) and between saturation and field capacity (E2); From which mean ET_c values of 2.27 mm d⁻¹ were obtained for E1 and 1.73 for E2 with the SEBAL model and 2.27 mm d⁻¹ for E1 and 1.73 for E2 with the METRIC model, during the tillering phase of the crop; The ANOVA test was performed with $p \leq 0.05$, with no significant difference between treatments of the same experiment, but between experiments.

Keywords: Rice cultivation, evapotranspiration, energy balance, RPA, SEBAL, METRIC.

I. INTRODUCCIÓN

En el Perú el cultivo de arroz se desarrolla en la zona costera cuya demanda hídrica alcanza 12000 a 15000 m³ ha⁻¹ (MINAGRI, 2017). Sin embargo, tanto en el Perú como en el mundo se proyecta una escasez de agua ocasionada por el cambio climático, es por ello por lo que se requiere optimizar el riego para cubrir las necesidades hídricas del cultivo. La estimación de la ET es importante en la gestión del agua de la agricultura de precisión. La ET es una combinación de dos procesos separados, la evaporación y la transpiración. La evaporación es el proceso mediante el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (Allen, Pereira, Raes y Smith, 1998). Luego, el vapor de agua se elimina de la superficie de evaporación. La transpiración es el proceso de vaporización del agua líquida contenida en los tejidos vegetales y su eliminación del vapor a la atmósfera (Allen, Pereira, Raes y Smith, 1998).

Existen diferentes métodos para calcular la ET, tradicionalmente se calculaba con lisímetros de pesajes o lisímetros de drenaje (métodos directos); sin embargo, son métodos que requieren de una previa instalación in situ y su aplicación a gran escala es muy costoso. Por el contrario, los métodos indirectos, donde se requiere un preprocesamiento de información, son fácilmente aplicables a gran escala. Niu et al (2019). La ET espacial medida indirectamente a partir de la teleobservación y sensores remotos (SR), ha cambiado radicalmente la capacidad de gestión de los recursos hídricos. Existen varios modelos de ET basados en SR (Li et al 2016) a partir del balance de energía, tales como los modelos Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) (Bastiaanssen, Pelgrum, et al., 1998) y el Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration (METRIC) (R. G. Allen, Tasumi, Morse, et al., 2007). METRIC se ha aplicado con imágenes satelitales de alta resolución para cuantificar la ET mensual y estacional, métodos que requieren correcciones radiométricas, atmosféricas (presencia de nubes) y geométricas (Nassar et al., 2020; Weiss et al., 2020). Estos modelos ayudan a los investigadores a obtener mediciones espacialmente, aunque la resolución de esas imágenes suele ser de 30 m, lo que no es lo suficientemente bueno para muchas aplicaciones de agricultura de precisión. La

sincronización del intervalo del tiempo de paso de los satélites no siempre es sincrónica con los requisitos de investigación. Obtener imágenes de alta resolución puede resultar muy caro (Park, 2018). Todas estas desventajas limitan la estimación de la ET mediante el uso de imágenes de satélites tradicionales. Es por ello que actualmente se viene investigando con mayor énfasis en los métodos indirectos, precisamente con el uso de las RPA, puesto que estos en comparación con las imágenes de los satélites, la resolución espacial de las imágenes puede ser de hasta 1 cm por píxel. Además, se puede volar una RPA en cualquier momento si las condiciones climáticas son buenas, y la nubosidad es menos preocupante que la teledetección por satélite; por lo tanto, se mejora la resolución espacial y temporal (Niu et al., 2019a).

Las RPA están equipados con cámaras multiespectrales y térmicas que facilitan la supervisión durante todo el ciclo del cultivo, lo que permite una detección e intervención oportuna en caso de cualquier anomalía. La utilización de RPA en la agricultura a pequeña escala, está destinada a garantizar la seguridad alimentaria a nivel de los hogares y la mejora de la gestión del riego en los países en desarrollo (Niu et al., 2020).

1.1. OBJETIVOS

El objetivo general fue estimar la evapotranspiración en tres variedades de arroz IR717006, IR43 y Sahood Ulan 12, mediante el uso de imágenes multiespectrales de un RPA durante la fase de macollamiento. Esto se cumple a través de los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar el índice del área foliar (IAF) y el índice de vegetación normalizado (NDVI), estimados a partir de imágenes multiespectrales de RPA con ajuste de valores medidos con sensores de mano, en el área experimental de riego.
- Estimar los componentes del balance de energía y temperatura superficial para el modelo SEBAL y METRIC, bajo condiciones de suelo saturado y no saturado.
- Evaluar los resultados de los modelos SEBAL y METRIC.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. BALANCE DE ENERGÍA PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE

Existen varios modelos de ET basados en sensores remotos, como el algoritmo de balance de energía superficial para tierra (SEBAL) (Figura 1), con ventajas en la estimación de los flujos de energía de la superficie. El proceso se da a través de la identificación de píxeles fríos y calientes y la determinación de la diferencia de la temperatura del aire cercana a la superficie. Esto puede aplicarse con cualquier sensor de satélite que tenga bandas espectrales.

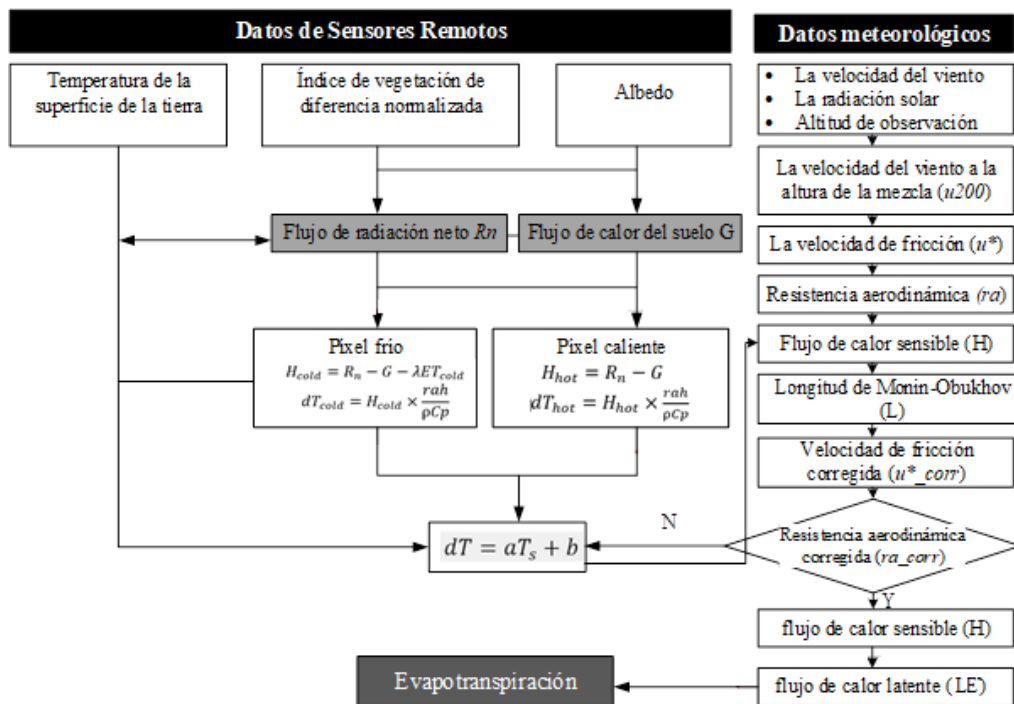


Figura 1: Diagrama de flujo del algoritmo de equilibrio de energía de la superficie de la tierra (SEBAL)

FUENTE: Adaptado de Lee & Kim (2016).

Varios estudios han aplicado el balance de energía utilizando información del satélite MODIS. La principal ventaja de MODIS es la alta resolución temporal, a intervalos de tiempo diarios. Sin embargo, en algunos estudios previos, SEBAL resultó tener varios inconvenientes: i) requiere especificaciones subjetivas de píxeles de ancla representativos, ii) cuando SEBAL se aplica sobre zonas montañosas, es necesario hacer ajustes basados en un modelo digital de elevación (MED), y iii) los errores en las temperaturas de la superficie (LST) o las diferencias de temperatura entre la superficie y el aire influye en las estimaciones del flujo de calor sensible (Lee & Kim, 2016).

SEBAL se basa en un balance completo de la radiación y la energía junto con las resistencias para el impulso, el calor y el transporte de vapor de agua para cada píxel en un área determinada. (Bastiaanssen, 1998,2000; citado por Lee & Kim, 2016)

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

donde LE es el flujo de calor latente (Wm^{-2}), Rn es la radiación neta en la superficie (Wm^{-2}), G es el flujo de calor del suelo (Wm^{-2}), y H es el flujo de calor sensible al aire (Wm^{-2}).

En el modelo SEBAL, se miden dos temperaturas del aire de referencia para calcular la temperatura del aire diferencia (dT). Una temperatura del aire se mide a la altura h_1 cerca de la superficie. El otro se mide a una altura superior de h_2 . Calcular dT para cada píxel, SEBAL asume que existe una relación lineal entre dT y la temperatura de la superficie (T_s) como:

$$dT = a + bT_s \quad (2)$$

dónde a y b son parámetros derivados empíricamente basados en dos píxeles fríos y calientes extremos, también llamados píxeles "ancla". Estos píxeles fríos y calientes definieron el límite del flujo de calor sensible. El píxel frío generalmente se selecciona de un área bien regada sin estrés hídrico. Los H se supone que es mínimo y ET debe ser máximo. El píxel caliente se toma de un campo seco y desnudo donde H es máximo y ET es casi cero. Los píxeles calientes y fríos generalmente se seleccionan mediante un método empírico (Niu et al., 2020) .

El modelo *Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration* (METRIC), es originalmente un modelo de procesamiento de imágenes satelitales para estimar la ET como un residuo del balance energético, que se basa en SEBAL. METRIC puede generar mapas de la ET con una resolución espacial de 30 x 30 m; tiene un proceso de auto calibración que contiene la ET de referencia horaria en tierra y la selección de píxeles fríos y calientes, eliminando la necesidad de calibrar la temperatura superficial absoluta (R. G. Allen, Tasumi, & Trezza, 2007). Al seleccionar los puntos de anclaje (píxel frío y píxel caliente), se define las condiciones límites para el equilibrio energético. El píxel frío se selecciona y define sobre un campo agrícola bien irrigado, sin estrés y con cobertura total, mientras que el caliente se selecciona y define para un suelo agrícola desnudo. Según Niu *et al.* (2020) existen tres diferencias entre SEBAL y METRIC: (i) para el píxel frío, MÉTRIC no considera al H valor cero, y en su lugar aplica un balance de agua del suelo superficial para establecer la ET como 1,05 veces la evapotranspiración de referencia (ET_o). (ii) en METRIC, los píxeles fríos se seleccionan en entornos agrícolas en lugar de características biofísicas. Y (iii) la extrapolación de la ET instantánea se basa en la ET_o en lugar de la fracción evaporativa real.

Para METRIC, la ET es estimada utilizando la ecuación de balance de energía, en que la radiación neta (R_n), se calcular sumando la radiación entrante y restando la saliente formulándose la siguiente ecuación:

$$R_n = (1 - \alpha)R_S \downarrow + R_L \downarrow - R_L \uparrow - (1 - \varepsilon_0)R_L \downarrow \quad (3)$$

Donde: R_S↓ es la radiación de onda corta incidente (W m⁻²); α es el albedo de la superficie, ver ecuación; R_L↓ es la radiación de onda larga incidente (W m⁻²), R_L↑ es la radiación de onda larga emitida (W m⁻²), ε_0 la emisividad térmica de la superficie (es adimensional). El H (Wm⁻²) se calcula a partir de la rugosidad de la superficie, la velocidad del viento y los rangos de temperatura:

$$H = \rho_{air} C_p \frac{dT}{r_{ah}} \quad (4)$$

Dónde r_{ah} es la resistencia aerodinámica (sm⁻¹) entre dos alturas superficiales. C_p es la capacidad de calor específico del aire, su valor equivale a (1004 J kg⁻¹K⁻¹), y ρ es la densidad del aire (kg m⁻³),

Según Allen *et al.* (2007) y Hardin y Jensen (2011), METRIC recomienda seleccionar píxeles fríos en un lugar homogéneo y bien regado donde el rango del NDVI sea de 0,76 a 0,84 y el rango de α sea de 0,18 a 0,24. Los píxeles calientes se deben seleccionar en suelo agrícola seco homogéneo y desnudo con NDVI inferior a 0,2. y α de 0,17 a 0,23.

Nhamo *et al.* (2020), menciona que el modelo METRIC fue desarrollado usando imágenes de satélite Landsat, pero el surgimiento de imágenes de alta resolución de RPA existe el potencial de mejorar más la precisión de estimación de la ET RPA. El enfoque del METRIC-RPA utiliza la banda térmica, que es detectada directamente desde la cámara multiespectral de RPA. El enfoque es similar al modelo METRIC, pero utilizando alta resolución de imágenes multiespectrales de RPA. La banda térmica se utiliza para calcular el balance energético de la superficie, y la información térmica se utiliza para estimar la densidad del flujo de calor sensible (H), la densidad del flujo de calor del suelo (G), y la radiación neta (Rn). Rn utiliza la temperatura de la superficie para estimar la emisión térmica de onda larga por la superficie.

2.1.1. Relación entre NDVI y Ts para la selección de píxeles calientes y fríos

Batahari *et al.* (2017) obtuvieron histogramas de NDVI y Ts utilizados para la detección automatizada de los píxeles frío y caliente, obteniéndose que los píxeles fríos caen dentro del rango inferior de las Ts y el rango superior del histograma del NDVI (Ver Figura 2), mientras que los píxeles calientes están dentro del rango superior de la Ts y el rango inferior del NDVI. Por lo tanto, recomiendan que: (i) la selección de píxeles fríos comienza con la búsqueda de la Ts dentro de un n_1 % más bajo y un NDVI dentro del n_2 % más alto, variando n_1 y n_2 desde 1% a 10%, pero manteniendo en un comienzo, el n_1 igual a 1 y n_2 alternando hasta 10, continuando el incremento de n_1 hasta que se identifiquen 10 o más píxeles. (ii) la selección del píxel caliente comienza con la búsqueda de la Ts dentro del n_1 % más alta y NDVI en el n_2 % inferior, alternando n_1 y n_2 desde 1 hasta 10 en la misma secuencia que para píxel caliente. (iii) en el caso que no se localicen los píxeles adecuados, estos valores podrían ser cambiados (por ejemplo, $n_1 = 10\%$ y $n_2 = 15\%$, $n_1 = 15\%$ y $n_2 = 20\%$, etc.),

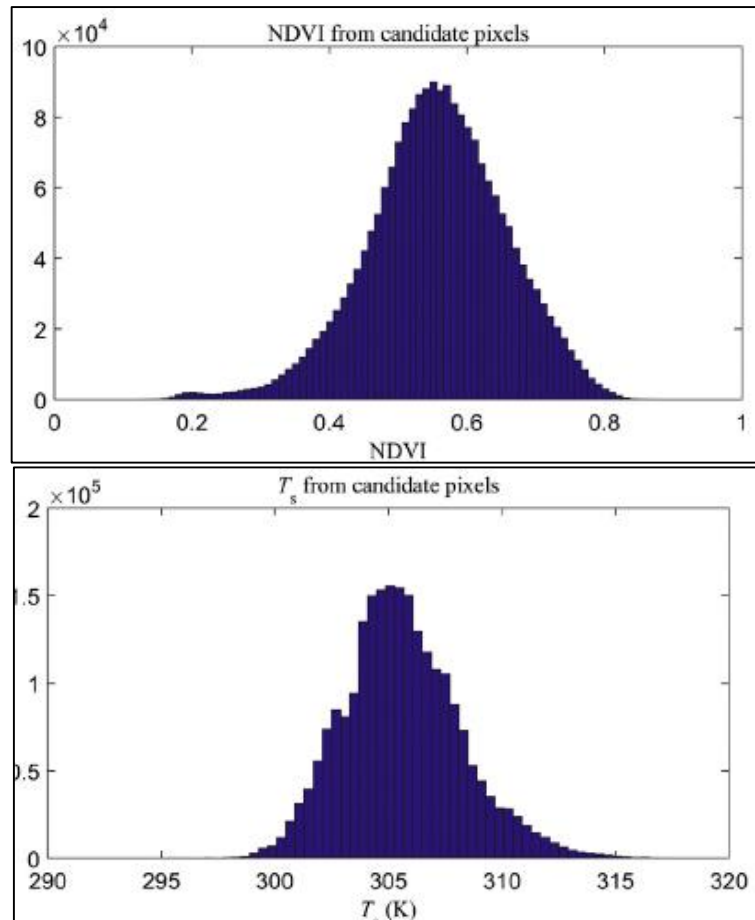


Figura 2: Histogramas de NDVI y T_s utilizados para la detección automatizada de los píxeles frío y caliente

FUENTE: Bhattarai *et al*, (2017)

2.2. BALANCE DE ENERGÍA PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN A PARTIR DE IMÁGENES DE RPA

Los vehículos aéreos no tripulados pueden mejorar la gestión del agua para la agricultura y productividad, estos incluyen la modelización de la ET, los índices de estresa hídrico, estimación de productividad.

La reflectancia de la radiación electromagnética (EMR) sobre plantas o la vegetación difiere dependiendo del contenido de clorofila, el tipo de planta, el contenido de azúcar y el contenido de agua dentro de los tejidos de la planta. La interpretación precisa de la reflectancia espectral a través de imágenes de alta resolución puede revelar deficiencias de agua y nutrientes, así como información sobre la salud de las plantas.

El NDVI derivado de RPA de alta resolución puede ser combinado con otros índices como el índice de estrés hídrico de los cultivos (CWSI) y el Índice de Contenido de Clorofila en el Dosel (CCCI) para delimitar con precisión los campos agrícolas y supervisar la salud de los cultivos. El CWSI identifica el estrés hídrico en cultivos dentro de las 24-48 horas previas a la detección de estrés por observación visual.

La productividad del agua (WP) (Ecuación (5)) es un término cuantitativo que se refiere a la relación entre el volumen de agua utilizado en los cultivos y la cantidad de cultivo producida expresada en $Kg \times m^{-3}$. Medida de un sistema agrícola determinado en relación con el agua que consume y se expresa como:

$$WP = \frac{\text{El beneficio agrícola}}{\text{El agua consumida}} \quad (5)$$

donde, el beneficio agrícola es el rendimiento real de la cosecha, el LB se expresa en unidades de masa como kilogramos ($Kg \times m^{-3}$), o el valor monetario (ingresos) de ese rendimiento expresado en dólares ($US\$ \times m^{-3}$) o valor nutritivo ($Kcal \times m^{-3}$).

El agua consumida (el denominador de la Ecuación (5)) se refiere al agua que se consume directamente por los cultivos. El WP es crítico para entender las relaciones entre el beneficio agrícola y el agua mientras ofrece un taburete para la evaluación de la eficiencia del uso del agua y la huella hídrica integrada en el comercio mundial de alimentos.

La resolución hiperespacial (de hasta un centímetro) proporcionada por RPA facilita una caracterización exhaustiva de la heterogeneidad espacial de los paisajes agrícolas en un nivel de campo. Sin embargo, la corta duración del vuelo y la limitada carga útil de los vehículos aéreos no tripulados siguen siendo la debilidad más flagrante para su aplicación en el contexto de la agricultura.

La elección de utilizar datos de RPA depende de los objetivos, la escala y la precisión de las necesidades de los usuarios y los recursos financieros disponibles. Las imágenes satelitales de alta resolución son costosas, mientras que el costo de imágenes de RPA se está volviendo cada vez más baja. Sin embargo, la principal desventaja de las imágenes de la RPA es su

baja cobertura.

Sobre la base del valor de RPA en la transformación de la agricultura en pequeña escala, se destacan los siguientes puntos (Nhamo et al., 2020):

- La propiedad comunitaria podría ser una opción, en particular para los planes de riego. El funcionamiento de RPA puede hacerse a través de oficiales de extensión que podrían ser entrenados para operar RPA, procesar, analizar los datos y transmitir la información a los pequeños agricultores.
- Las plataformas basadas en la nube facilitan la interacción con los datos de los drones entre muchos usuarios para poder manipular o adquirir información al mismo tiempo. Estos sistemas basados en la nube con plataformas de almacenamiento de datos continúan volviéndose más asequible.
- La disponibilidad de imágenes de la RPA térmicos y multiespectrales obtenidas al mismo tiempo está aumentando el desarrollo de conjuntos de datos de la ET más precisos. Los actuales conjuntos de datos de la ET derivados de satélites son generalmente resoluciones gruesas, lo que las hace inadecuadas a escala de campo.
- El uso de RPA térmicos y multiespectrales revoluciona la agricultura de los pequeños agricultores al abordar desafíos agrícolas y otras tareas colectivamente, llevando así la agricultura de precisión a hogares agrícolas anteriormente desfavorecidos.
- Una RPA pueden convertir a los pequeños agricultores con fincas que actualmente carecen de tecnología inteligente en tierras de cultivo mediante la inspección de los cultivos y la generación de datos en un corto periodo de tiempo y a bajo costo, y la supervisión de campos en casi tiempo real para permitir una aplicación precisa de los insumos y la programación del riego.
- El impacto de los fenómenos meteorológicos extremos en la agricultura de los pequeños agricultores exige un mecanismo seguro urgente para mejorar la resistencia al cambio climático. La alta precisión de las imágenes de RPA y resolución temporal definida por el usuario les conviene para desarrollar un seguro de cosecha preciso basado en índices para el beneficio tanto de los pequeños agricultores como de los aseguradores.

Los métodos de estimación de la ET y las aplicaciones agrícolas relacionadas se han desarrollado bien durante las últimas décadas. Aunque los modelos de la ET de teledetección

pueden ayudar a obtener datos de la ET distribuidos espacialmente con relativa precisión. Cada modelo de estimación de la ET tiene sus ventajas y desventajas. Los métodos METRIC/SEBAL son más reconocidos por los investigadores de teledetección, pero se basan en plataformas satelitales (Landsat). Se necesitarían modificaciones significativas para que funcionen con imágenes de RPA. El modelo TSEB es menos conocido, pero ofrece más potencial para aplicaciones de RPA en muchas condiciones de cultivo, especialmente cultivos arbóreos como almendras, granadas o melocotones. Al volar una RPA, las condiciones climáticas, el tamaño del campo, el tiempo de vuelo. Hay cinco requisitos para mapear la ET con alta fidelidad en el futuro, que son de alta frecuencia, alta resolución espacial, alta resolución temporal, gran cobertura espacial y monitoreo a largo plazo. La alta frecuencia mejorará la diferenciación del estrés hídrico entre cultivos, lo que permite una gestión del agua más eficiente. La alta resolución espacial puede ayudar a detectar respuestas espacialmente heterogéneas al estrés hídrico. Como la ET es muy variable dentro y entre días, la alta resolución temporal puede ayudar a detectar la ET de los cultivos en tiempo real. Una gran cobertura espacial puede ayudar a detectar sequías a gran escala. El monitoreo a largo plazo será importante para registrar la variabilidad de la ET con el tiempo (Niu et al., 2019b).

2.2.1. Aplicación de SEBAL con imágenes de RPA

Montibeller et al. (2017) utilizaron el modelo SEBAL para estimar los flujos de energía y la ET del maíz y la soja en Ames, Iowa. La RPA utilizado fue el eBee Ag (SenseFly, Cheseaux-sur-Lausanne, Suiza), cubría 12 km² de área en un vuelo. Y contaban con una cámara Canon, el sensor multiespectral Sequoia y cámara thermoMAP; colectando imágenes en floración, formación de rendimiento y maduración. Midieron el albedo y la reflectancia con un espectrorradiómetro; obteniendo que SEBAL subestima un 17%, probablemente por presencia de nubes durante el vuelo con RPA.

Para el flujo de calor sensible, se requirió un método de calibración interna. El desafío fue en cómo seleccionar adecuadamente los píxeles fríos y calientes. Para resolver este desafío, Montibeller et al. (2017) utilizó un cuerpo de agua para la selección de píxeles fríos colocando una bandeja evaporativa. La bandeja evaporativa, sin embargo, difiere de un cuerpo de agua natural, que afecta el cálculo de la radiación neta R_n y el flujo de calor del suelo G . Por lo tanto, los píxeles de anclaje generalmente se seleccionan de los píxeles más

fríos en las imágenes de RPA. El r^2 para el flujo de calor sensible H es 0,5, con un RMSE de 8.84 Wm^{-2} . El valor estimado por SEBAL sobreestimó el flujo de calor sensible en un 5%, valor dentro del campo que fue de alrededor de $91,84 \text{ Wm}^{-2}$ durante la temporada de crecimiento del cultivo.

El r^2 del flujo de calor latente LE fue de 0,82, con un RMSE de $2,67 \text{ W m}^{-2}$. Sus resultados muestran que LE varía a medida que se desarrolla el cultivo. La tasa de ET es relevante según la etapa de crecimiento del cultivo. El maíz, por ejemplo, tiene tasas de ET más altas hasta que aparece la espiga. La media máxima para LE es $564,90 \text{ Wm}^{-2}$, y la media mínima es de $256,22 \text{ Wm}^{-2}$. La relación entre el NDVI y la ET también se sobreestimó, debido a que existe una relación lineal entre NDVI y ET (Montibeller et al., 2017). Sin embargo, la correlación entre el NDVI y la ET es muy pobre, con un r^2 de alrededor de 0,01. Una de las razones es que la humedad del suelo puede afectar la predicción del NDVI (Allen et al., 2005).

En general, Montibeller et al. (2017) demostró que el modelo SEBAL se puede utilizar para estimar la ET con RPA. Los valores de MAE y RMSE muestran que SEBAL puede estimar muy bien la ET con las imágenes de RPA. La plataforma RPA también tiene un gran potencial para ayudar a los agricultores a tomar decisiones con las condiciones del cultivo en tiempo real en un futuro cercano, lo que puede monitorear el consumo de agua de cada cultivo en el campo.

2.3. ESTIMACIÓN DE LA ET DEL CULTIVO DE ARROZ A PARTIR DE IMÁGENES DEL SATÉLITE MODIS Y LANDSAT

Diversos autores estimaron la ET en arroz, a partir de información de satélite. Al respecto: Lee & Kim. (2016), muestran la variación diaria de los componentes de balance energético sobre la superficie transpirante bien regado en un día despejado en un arrozal indica que el flujo de calor del suelo se encuentra en el rango de 0 a 100 Wm^{-2} y el flujo de calor sensible se encuentra en el rango de aproximadamente 50 a 400 Wm^{-2} . Obteniendo que, en condiciones climáticas casi nubladas, la radiación solar (R_s) en lugar de $R_a(24)\tau(\text{sw})$, mejoró los resultados del r^2 del SEBAL en arrozales de 0,52 a 0,77, es decir utilizó un valor medido local (en tierra) para la radiación solar (R_s) de 24 horas en lugar de $R_a(24)\tau(\text{sw})$. Esto depende del porcentaje de nubosidad del lugar de estudio (Ver Figura 3).

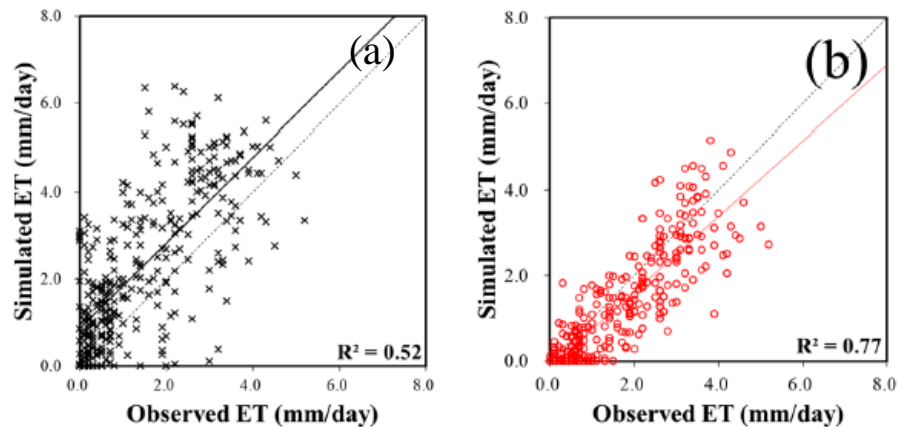


Figura 3: Diagramas de dispersión que comparan la ET obtenida con SEBAL y obtenida a partir de información de la torre de flujo en arrozales: con radiación extraterrestre (a) y radiación solar (b).

FUENTE: Lee & Kim, (2016)

En la se muestra la ET en arrozales obtenida por Lee & Kim (2016) con ET total de 496,1 y 467,8 mm para el 2012 y 2013 respectivamente (torre de flujo) y 5,2 y 5,3 mm d⁻¹ según la torre de flujo y SEBAL, respectivamente; con mejor ajuste de la ET para el año 2013 con valores de Índice de Nash de 0.73 y r² de 0.80.

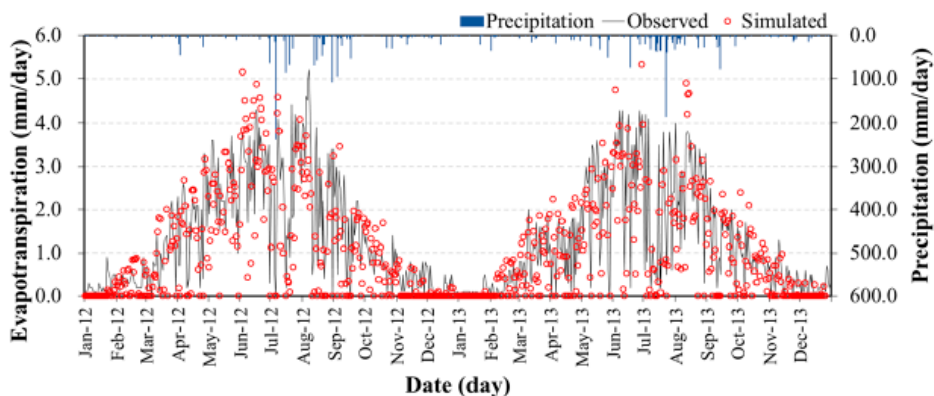


Figura 4: Variación temporal de la ET obtenido con SEBAL (simulado) y la torre de flujo (observado) en arrozales.

FUENTE: Lee & Kim, (2016)

La Figura 5: Comparación de los datos mensuales del NDVI (a), albedo (b), ET de torre de flujo (c) y ET de SEBAL (d) en un arrozal (CFK) y un bosque (SMK, DMK) muestra los datos mensuales del NDVI, el albedo y ET según las torres de flujo. El NDVI

de la zona de arrozales muestra el patrón de crecimiento y desarrollo de la planta de mayo a septiembre. En la temporada de invierno (particularmente en diciembre), el NDVI del bosque tiende a ser más bajo que el de arrozales, esto debido a que está situado a una mayor altitud. Es decir, SEBAL refleja las características geográficas, con ET en las zonas bajas, mayores que en zonas de mayor altitud.

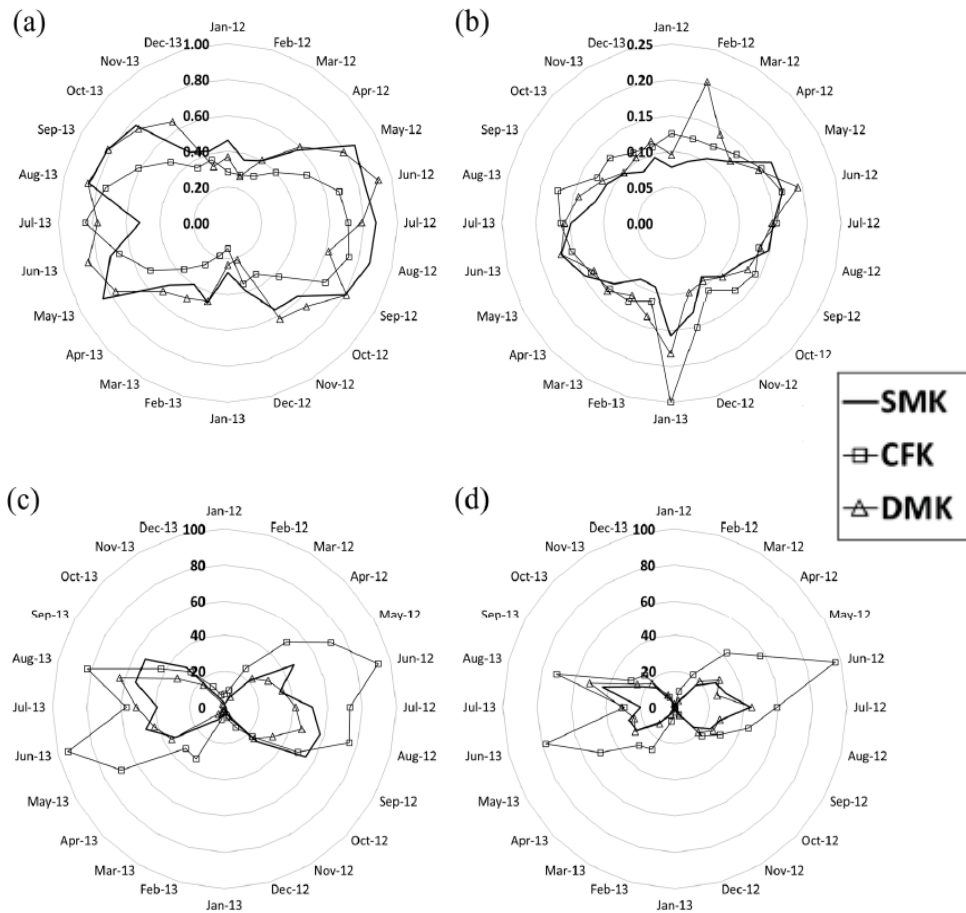


Figura 5: Comparación de los datos mensuales del NDVI (a), albedo (b), ET de torre de flujo (c) y ET de SEBAL (d) en un arrozal (CFK) y un bosque (SMK, DMK)

FUENTE: Lee & Kim, (2016)

Las condiciones climáticas como la baja temperatura, nieve y las heladas tienen un efecto negativo en la vitalidad de la vegetación, que da lugar a valores bajos del NDVI. En bosques y arrozales, el albedo tuvo patrones de aumento y disminución según la estación, similares al NDVI. En cambio, en invierno (diciembre a febrero), el albedo muestra rápidamente patrones de aumento, y se supone que la nieve tiene un efecto en el albedo. Para ambos

conjuntos de datos, la ET de en arrozales fue más alta que la de bosques y alcanzó un valor máximo en junio y luego disminuyó en Julio y septiembre. En agosto, la ET aumentó nuevamente debido a la temporada de lluvias en Corea del Sur.

Sawadogo et al. (2020) realizaron experimentos en Burkina Faso (Africa), en una extensión de 1200 hectáreas. Posee un clima subhúmedo, presenta dos etapas: estación de lluvia y seca, con temperaturas mensuales promedio de 18 a 37°C, una humedad relativa entre 20 y 38% y un promedio de lluvias anuales entre 900 y 1100 mm. En la investigación consideraron los siguientes cuatro indicadores para estimar el rendimiento de un sistema de irrigación, entre ellas la fracción agotada, evapotranspiración relativa (k_c), uniformidad del consumo de agua y uniformidad de las aguas de cultivo, de las cuales solo extraeremos el K_c y su cálculo de ETC:

En la Figura 6 se presenta la evapotranspiración real (mm), por el método SEBAL, obteniéndose valores promedios de 635 y 709 mm en 2013 y 2014, respectivamente. Observándose un aumento de un 12% para el cultivo de arroz.

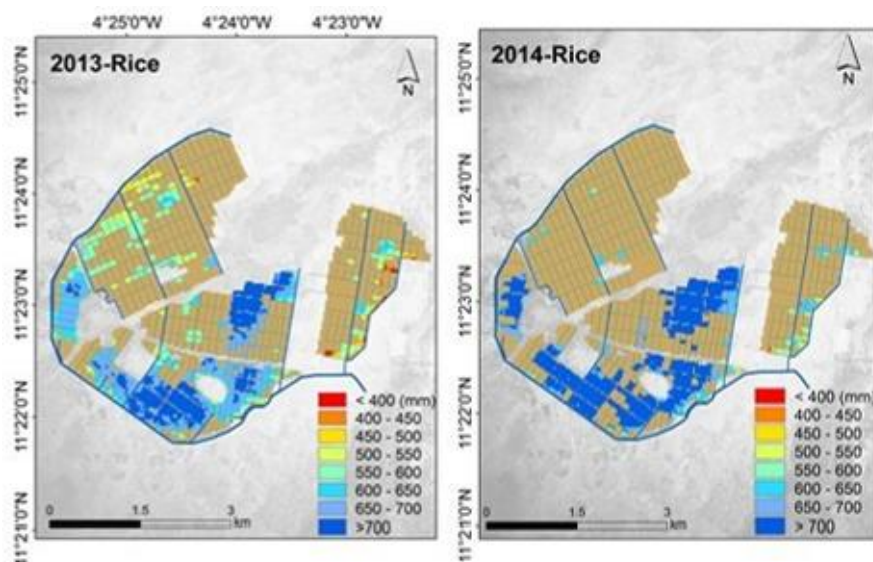


Figura 6: Variación espacial de la ETC en arrozales del valle de KOU en Burkina Faso (África), en época seca del 2013 y 2014.

FUENTE: Sawadogo et al, (2020)

En la Figura 7 se observa un gradiente hacia el norte de la ETC, lo que dio lugar a cuatro zonas principales del cultivo, según el grado de estrés hídrico. En la parte norte se ubicaron

las zonas con gran estrés hídrico, en la zona central obtuvieron estrés hídrico moderado y las zonas bien regadas se encontraron en la parte sur.

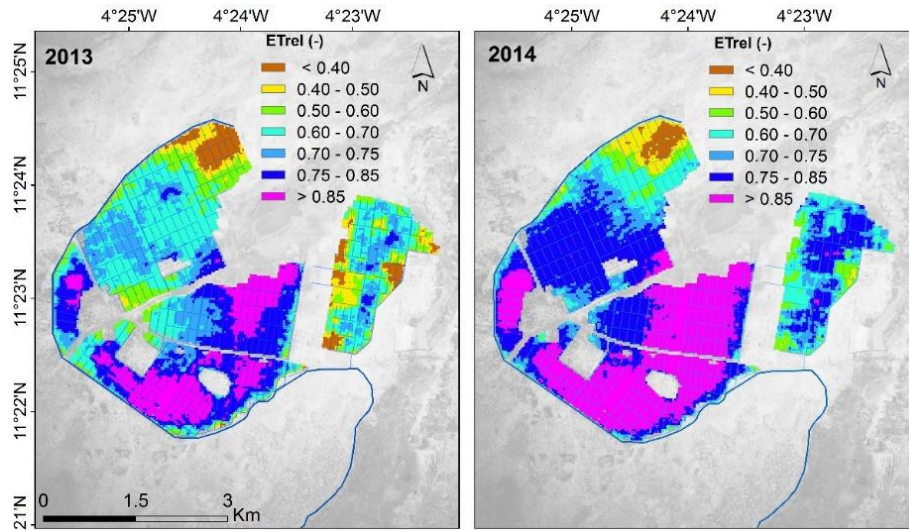


Figura 7: Distribución espacial de la ETrel en todo el sistema de irrigación del valle de Kou en Burkina Faso (África), durante la etapa de producción de la estación seca en 2013 y 2014.

FUENTE: Sawadogo et al. (2020)

En la Figura 8 se muestra valores de ETrel mayores a 0.75, lo cual indica un patrón de mejora para el cultivo de arroz, obteniendo óptimos rendimientos, a partir de los 50 días para ambas campañas.

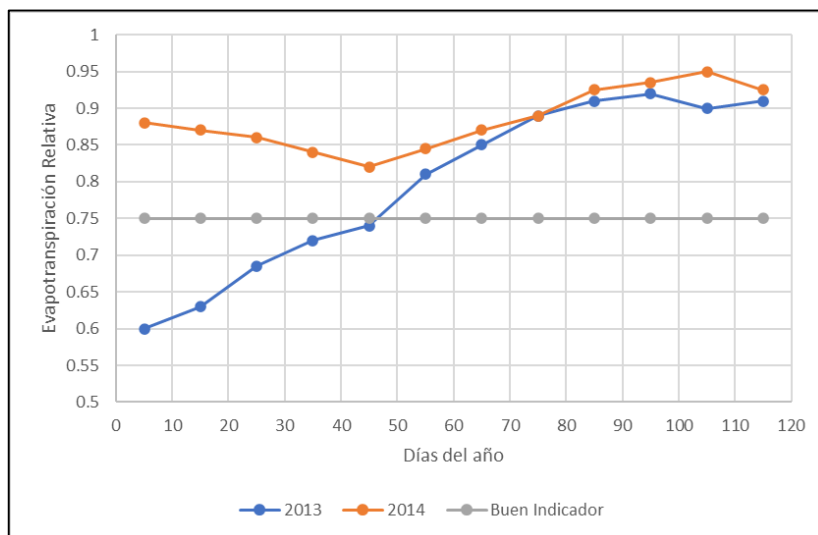


Figura 8: Variación de la evapotranspiración relativa para el cultivo de arroz de enero a abril del 2013 y 2014 en el valle de Kou en Burkina Faso (África).

FUENTE: Sawadogo et al, (2020)

Taherparvar & Pirmoradian (2018), realizaron un estudio para la estimación de la evapotranspiración del arroz (ET_{carroz}) en Irán. El área de arrozales fue de 3 504 km², a partir de información de satélite Landsat y un mini lisímetro cilíndrico con un diámetro de 56 cm que se instaló a una profundidad de 60 cm y densidad de 6 plantas a 20 cm × 20 cm de espacio en cada mini lisímetro eran los mismos que los circundantes. Los errores más altos en la estimación del K_c pueden estar relacionado con las inundaciones y la vegetación en los arrozales durante este periodo. Sobre el promedio, el modelo calibrado de K_c -VI con el ME de 0.02 presentó el mejor desempeño en comparación con otros modelos. El K_c para los campos de arroz son 1,05, 1,20 y 0,60 en el crecimiento inicial, medio y periodos tardíos. Belmonte et al, (2005) obtuvieron el K_c como una función de un índice de vegetación (IV) a partir de datos de teledetección; representando una relación lineal entre NDVI y el K_c ($K_c = 1,25 \times \text{NDVI} + 0,2$), donde el NDVI se calculó comparando los valores de energía reflejada por la vegetación en rangos espectrales visibles (rojo) a infrarrojo cercano (NIR) (Taherparvar & Pirmoradian, 2018).

Los mapas de ET_{carroz} fueron realizados a partir del K_c del modelo de K_c -IV y la ET_o del método de Penman-Monteith. Se compararon el observado y medido de la ET_{carroz} durante 7 estaciones de lisímetros que mostraron un NRMSE de 21.3% en promedio. La ET_{carroz} oscilo entre 3.4 y 8.4 mm d⁻¹ (con una media de 6.6 mm d⁻¹) y 4.3 a 6.7 mm d⁻¹ (con una media de 5.1 mm d⁻¹) en 2012-06-15 y 2013-06-18, respectivamente.

Para Taherparvar & Pirmoradian (2018), la ET_c es uno de los factores importantes para evaluar la gestión de los recursos hídricos y, por tanto, la predicción de la ET_c a escala regional puede tener un papel importante en las decisiones de macro gestión incluida la asignación de recursos hídricos. Entonces, debido a las costosas mediciones de campo y acceso gratuito a las imágenes del satélite Landsat, el modelo desarrollado se puede utilizar para las decisiones de la macro gestión local. Sin embargo, las mediciones de campo son costosas. Las imágenes de Landsat son de acceso gratuito y se puede lograr una mayor precisión utilizando más datos para el modelo de calibración.

Además, indican que el modelo K_c -IV calibrado en combinación con la ET_o basado en las imágenes Landsat 7 ETM+ podría proporcionar una buena estimación de la ET_{carroz} a escala regional, y se puede aplicar para estimar el requerimiento de agua con información libre y

de fácil acceso, al final recomendaron que es necesario mejorar la gestión del agua de riego, en particular durante las etapas fenológicas tempranas y tardías de los cultivos.

2.4. CULTIVO DE ARROZ EN EL PERÚ

En el Perú el consumo el cultivo de arroz es esencial en cada familia, por lo que al aumento de la población también aumente su consumo, es por ello por lo que la producción del arroz en el Perú, desde 2010 hasta el 2019 ha crecido 1.12 veces, pasando de 2831374 toneladas a 3188306 toneladas, sembraban alrededor de 388659 ha y para el año 2019 se siembran aproximadamente 414 509 ha, un aumento con más de 1.2 veces el área de producción. El rendimiento ha mantenido también una tendencia positiva durante este período, pasando de aproximadamente 7.29 tn ha⁻¹ a 7.69 tn ha⁻¹, debido a la adaptación de la especie cultivada a la zona de cultivo mejorando la producción y con un menor consumo de agua como mostramos en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1: Estadísticas agrarias de arroz cáscara en el Perú

Año	Área de cultivo (ha)	Rendimiento (tnha ⁻¹)	Producción (tn)
2010	388 659	7,29	2,831,374
2015	399 501	7,89	3,151,408
2016	419 563	7,55	3,165,749
2017	426 253	7,31	3,115,544
2018	437 938	8,12	3,557,900
2019	414 509	7,69	3,188,306

FUENTE: Data de FAO, www.fao.org/faostat/en/#data/QC, 2019.

En la Figura 9 se presenta los principales productores de arroz cáscara por departamento en el 2018, siendo el principal productor el departamento de San Martín seguido de Piura y Lambayeque.

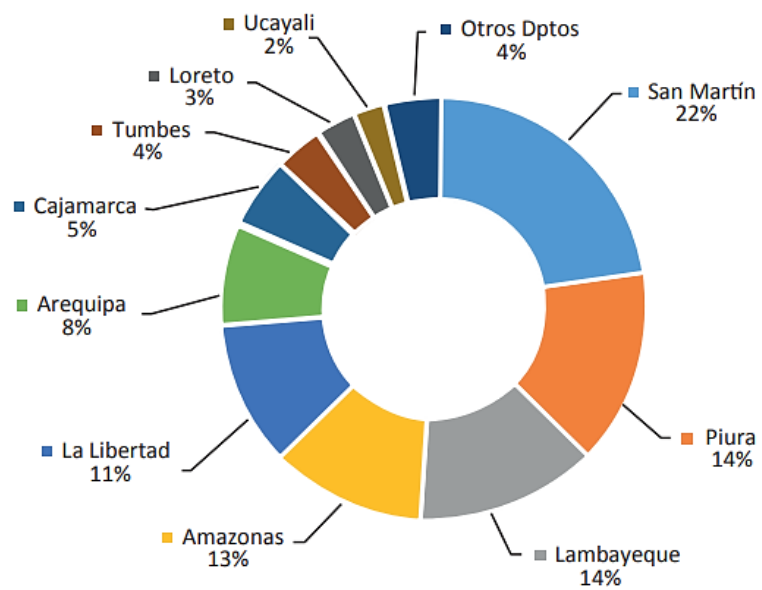


Figura 9: Principales departamentos productores de Arroz cáscara en 2018

FUENTE: MINAGRI-DGESEP-DEA

III. METODOLOGÍA

3.1. ZONA DE ESTUDIO

La investigación se realizó en el Área Experimental de Riego (AER), de la Universidad Nacional Agraria la Molina, Distrito La Molina, Provincia de Lima, Región Lima. Con coordenadas geográficas: Latitud: 12° 04' 50" S; Longitud: 76° 57' W, a una altitud: 244 m.s.n.m. observándose en la Figura 10.

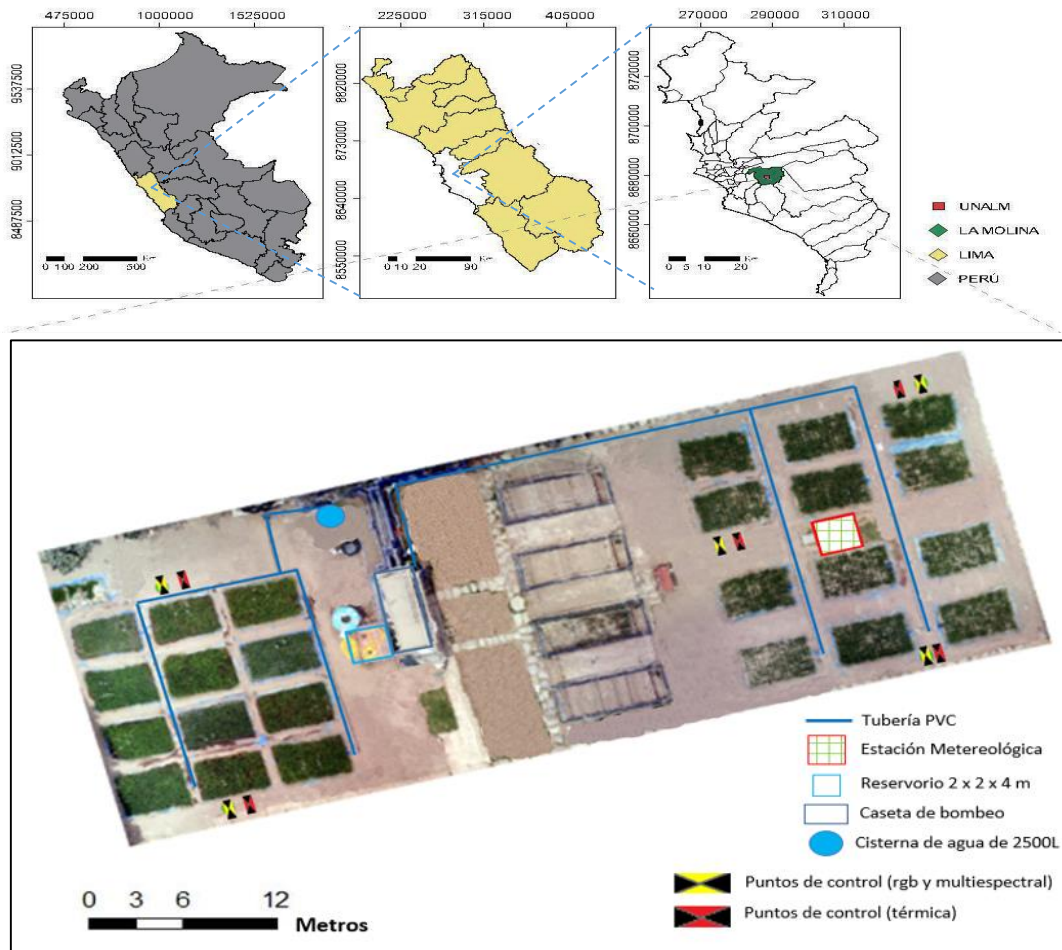


Figura 10: Ubicación del experimento de arroz, en el Área Experimental de Riego - UNALM

3.2. MATERIALES Y EQUIPOS

Los materiales y equipos que se emplearon en la investigación, se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Materiales, equipos y herramientas

Equipos	Características técnicas	Uso-aplicación
Aeronave pilotada remotamente (RPA)	Marca DJI, modelo Matrice 210.	Acople de cámaras, sensores térmicos y sensores multiespectrales.
Cámara termográfica	Marca FLIR Vue Pro, modelo R640. Resolución 640x512 pixeles, operatividad de -20°C a + 50°C, rango espectral: 7.5 – 13 μm .long. focal :13mm, ancho de sensor: 100.88	Captura de imágenes térmicas y ópticas (RGB, TIF y Radiométrica). .
Cámara multi - espectral	Marca Parrot Sequoia, 4 sensores monocromáticos verde, rojo, borde rojo, infrarojo cercano, sensor de reflectancia Sunshire.	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
Ceptometro	Marca Accupar, modelo LP-80, 80 sensores independientes espaciadas a 1 cm.	Mide la radiación fotosintética activa (PAR) , el índice de área foliar (IAF) .
Green Seaker	Marca Trimble, emite ráfagas de luz roja e infraroja.	Mide directamente el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI).
Termocupla (STT)	Marca OMEGA, modelo TT-T-36-SLE-500, tipo T, y dataloggers marca Campbell Scientific	Registro y almacenamiento de temperatura al contacto del follaje
Sensores de humedad de suelo	Marca Decagon EM50. Greenhouse Sensor 3 GS3, y datalogger Em50 Decagon)	Registro y almacenamiento de humedad volumétrica, CE, TE del suelo. Usa técnica de dominio de frecuencias (FDR).
Estación automática meteorológica	Marca Davis Vantage Pro 2	Registro y almacenamiento de datos climatológicos
Estación GPS Diferencial	Marca Topcon, modelo Hiper SR.	Colocación de puntos de control.
Sistema de riego	Red de tubería, reservorio de 12 m ³ y tanque de 25 m ³ , tubería de 2 y 1 pulgadas	Riego del cultivo.
Insumos	Características técnicas	Uso-aplicación
Semilla	Variedades tolerantes a la sequía: IR 43; IR71706; Sahood Ulan 12	Dosis de fertilización (350-90-200)
Software	Características técnicas	Uso-aplicación
Pix4D Maper Pro	Software fotogramétrico.	Procesamiento de las imágenes térmicas y multi - espectrales.
FLIR Tools	Software desarrollado por compañía fabricante de cámaras térmicas.	Procesamiento de imágenes térmicas
ArcMap	Software de SIG, versión 10.3.1	Procesamiento de Ortomosaicos de las imágenes térmicas y multi-espectrales.
Matlab 2015	Lenguaje de programación	Construcción de gráficas.

a. Cámara multispectral

El sensor multispectral a bordo de RPA fue una cámara multispectral Parrot Sequoia (Parrot S.A., France) de cuatro bandas multispectrales con obturador global de 1,2 MP, que captura imágenes en verde (550 nm), rojo (660 nm), borde rojo (735 nm) e infrarrojo cercano (790 nm), sensor “Sunshire” que capta la intensidad de la luz que irradia el sol en estas mismas 4 bandas espectrales; y la cámara RGB de 16 MP. Las imágenes se corrigieron radiométrica, atmosférica y geométricamente. Para la calibración radiométrica de las imágenes multispectrales, se utilizó un panel de reflectancia calibrada (Tarjeta AIRNOV) y un sensor de luz solar que ajusta automáticamente las lecturas a la luz ambiental (Han et al., 2019).

La corrección geométrica se realizó incorporando cinco puntos de control (GCPs) instalados con posicionamiento de un equipo geodésico GNSS marca SR. Topcon Modelo Hiper. Estos GCPs se ubicaron en los límites y acceso de parcelas con mayor visibilidad. El método empleado para la georreferenciación de las imágenes multispectrales y térmicas se realizó mediante la transformación polinómica basadas en puntos de control y un algoritmo de la ecuación por mínimos cuadrados.

b. Cámara térmica

El sensor térmico corresponde a una cámara térmica FLIR Vue Pro R 64 fabricado por FLIR Systems (Wilsonville, EE.UU.), con lente de 13 mm y frecuencia de 30 Hz para registrar mediciones de temperatura en el rango de 7.5 – 13.5 μm , tiene una precisión de ± 5 °C y una sensibilidad térmica de 0.05 °C. Se utilizó la aplicación FLIR UAS para ingresar parámetros iniciales como la emisividad, la temperatura ambiente, las condiciones de cielo y el intervalo de tiempo entre cada fotografía; obteniéndose la imagen en formato Tiff (temperatura relativa) y el formato Radiometric-JPG (°C grados Celsius).

3.3. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental es del tipo “diseño de bloques completamente al azar con estructura factorial con dos experimentos” en el que se tiene el experimento 1 (E1), se aplicó humedad del suelo a saturación y el experimento 2 (E2) se aplicó humedad del suelo entre saturación y capacidad de campo por secas controladas, esto durante la fase de macollamiento. En E1

se tiene variedad de cultivos en 3 tratamientos V1: IR43, V2: IR71706, V3: Sahood Ulan 12, y cuatro repeticiones; y en E2, se tuvo las mismas variedades y repeticiones.

En cada experimento se realizó el DBCA con 3 tratamientos y 4 repeticiones individual, con prueba de homogeneidad de variancias, y luego se realizó el análisis combinado de experimentos, utilizando el programa InfoStat.

Haciendo un total de 24 parcelas de 4 m x 2.5 m (ver Figura 11). El E1 comenzó a los 30 días después de la siembra (DDS) y finalizó una semana antes de la cosecha; las parcelas fueron preparadas para darles las condiciones de saturación con instalación de plásticos en los lados laterales de las parcelas a 45 cm de profundidad y solo en T1 del E1 se adiciono un plástico con orificios en la parte inferior a profundidad de 45 cm, tratando de condicionar el suelo a saturación; mientras que en el E2, el manejo de secas se efectuó entre los estadios de macollamiento e inicio de primordio floral del cultivo, que corresponden entre los 48 y 101 DDS. Se realizaron un total de 8 secas escalonadas que alcanzaron valores de tensión del suelo entre los a -20 a -35 kPa. Antes y después del periodo de secas, el riego fue continuo hasta días previos a la cosecha. El resto del periodo del cultivo, la humedad del suelo se mantuvo entre valores de capacidad de campo ($\Theta_{CC}= 17.5\%$) y saturación ($\Theta_{SAT}= 44.9\%$).

En el cultivo se diferenciaron las fases fenológicas: vegetativa, reproductiva y maduración; dentro de los cuales se separó por los estadios vegetativos: emergencia, plántula, macollamiento, primordio floral, estado de uso, floración, grano lechoso, grano ceroso, grano maduro y madurez fisiológica por medio de la observación de características propias de cada fase como órganos específicos del cultivo que se desarrollaron por variables ambientales y manejo del cultivo que influyen en la duración de cada estadio.

La información climática se registró en la estación automática Davis-modelo Vantage PRO 2, instalada en la zona de estudio. Se recolectaron los datos horarios de temperatura máxima y mínima en ° C (T_a), velocidad de viento en $m\ s^{-1}$ (u), precipitación en mm (pp), humedad relativa en % (H_r) y evapotranspiración referencial en $mm\ h^{-1}$ (ET_o).

Las muestras de suelo para el análisis de las características físico-químicas del suelo se

llevaron al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Facultad de Agronomía - UNALM; las muestras se extrajeron a 15 cm de profundidad por cada parcela para su posterior homogenización y análisis (Ver Figura 40, Anexo 2). Resultando un suelo de textura franco-arcilla-arenosa, con CE 0.76 ds m^{-1} y 0.86 ds m^{-1} y pH de 7.36 y 7.53 para E1 y E2 respectivamente, por lo que no afecta el desarrollo del cultivo.

El agua de riego usada en el experimento proviene del rio Rimac, que ingresa a la UNALM y se almacena en un reservorio de la Unidad de Riego Tecnificado (URT) de la UNALM, la cual distribuye el agua en las diferentes zonas del campus universitario. También, se disponía de un reservorio de 12 m^3 y un tanque de 25 m^3 en el Área Experimental de Riego (AER). Los análisis de calidad de agua se realizaron en el Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertirriego de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la UNALM (Ver Figura 41, y Figura 42, Anexo 2).

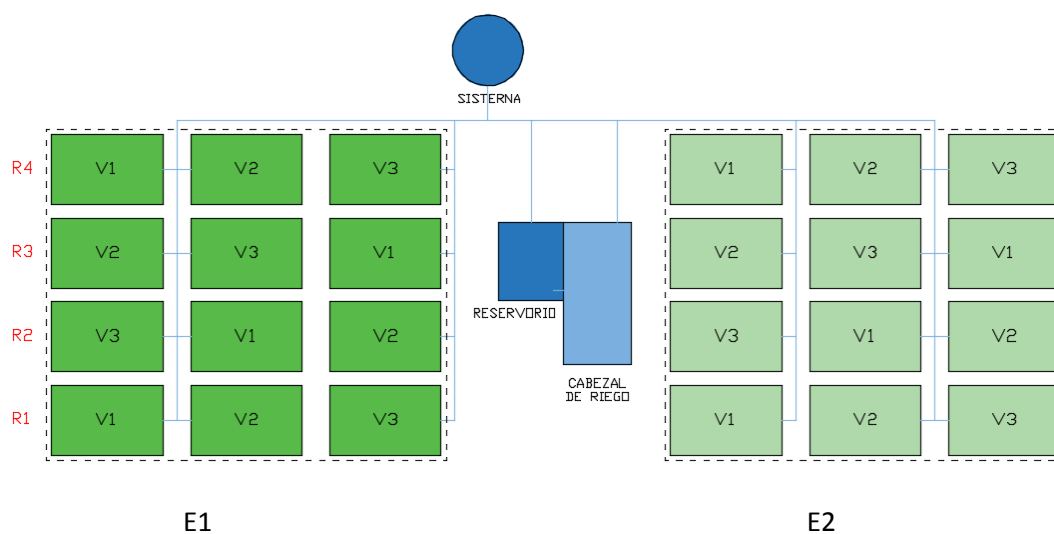


Figura 11: Diseño experimental

V1: Variedad IR43

V2: Variedad IR71706

V3: Variedad Sahood Ulan 12

R1, R2, R3, R4: Repeticiones

E1: Unidades experimentales con humedad de suelo a saturación

E2: Unidades experimentales con humedad de suelo entre saturación y capacidad de campo

3.4. PROCEDIMIENTO

3.4.1. Índices de vegetación (NDVI, IAF), albedo y temperatura superficial (Ts)

El plan de vuelo para RPA se programó con la aplicación DJI Gsp Pro, a una velocidad de 2 m s^{-1} , una altura de 20 m, un traslape frontal de 80 % y lateral de 73 %. La altura de vuelo se estableció a 20m se, además, se instaló 5 puntos de control en todo el campo, y el vuelo se realizó cerca a las 12:00 m. con cielo despejado. Las imágenes multiespectrales, térmicas y RGB fueron procesadas en el software Pix4D para la formación de ortomosaicos. En el caso de la imagen térmica se incorporó manualmente los puntos de control. Con la imagen RGB se generó el modelo de elevación digital del suelo.

Con la información de las imágenes multiespectrales, se estimaron:

a. Índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI)

Se midió el NDVI en campo con un sensor de cultivo portátil GreenSeeker, tomando la lectura a una distancia de 30 cm sobre el arroz; se registró 6 datos por parcela, tomando en total 144 datos por fecha de registro. Por otro lado, se estimó el NDVI a partir de reflectancias de las bandas rojo (R) e infrarrojo (IRC) de las imágenes multiespectrales basándose en la ecuación siguiente:

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R} \quad (6)$$

Se comparo los NDVI medido en campo y estimado según el coeficiente de determinación (r^2) y coeficiente de Pearson (R) obteniendo una ecuación de ajuste.

b. Índice de área foliar (IAF)

Se determino en campo el IAF con ayuda del ceptometro AccuPAR PAR, model LP-80, el equipo mide la intercepción de la radiación PAR, dentro y fuera del follaje (ver Figura 12), teniendo un error menor al 0.05, relacionándose en la fracción de radiación PAR permitiendo estimar el IAF . El equipo se ubicó sobre el suelo a una distancia de 20cm dentro del cultivo, con un sensor externo ubicado a unos 30 cm sobre el cultivo para la toma de lectura, Se registró 3 datos por cada parcela, tomando

en total 72 datos por fecha de registro; los datos registrados por el equipo son tan seguros como el método destructivo, indicado por el Mendoza et al (2017) que las mediciones pueden llegar a tener un r^2 de 0.99 y cuya relación mejora conforme aumenta el dosel.. Por otro lado, se estimó el IAF relacionándolo con el NDVI RPA ajustado a datos de campo y el IAF tomados en campo, seleccionando solo las relaciones de las cuatro primeras fechas de registro por tener mayor coeficiente correlación de Pearson (R).

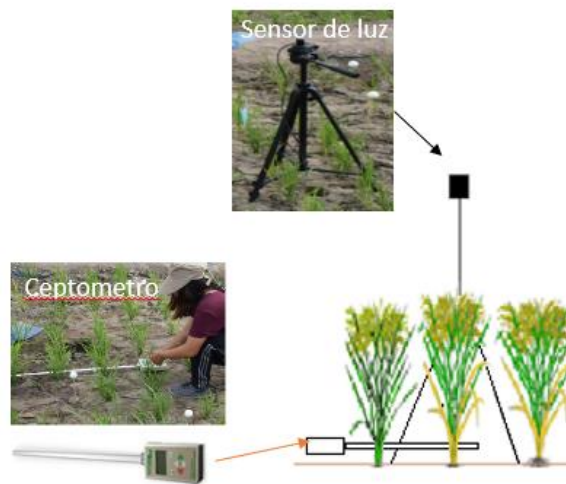


Figura 12: Medición de la radiación par con el ceptómetro

c. Albedo

El albedo se calculó como la media entre las reflectancias normalizadas de las bandas Rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC) de las imágenes multiespectrales, según ecuación (7). (Tsouni et al., 2008)

$$a = \frac{IRC + R}{2} \quad (7)$$

d. Temperatura superficial (Ts)

Se determinó en campo la temperatura del follaje (termopar) registradas por las termocuplas (STT), tomando lecturas cada 5 min. Por otro lado, se registró la temperatura superficial tomada por la cámara térmica FLIR VUE PRO al momento de cada ejecución de vuelo.

3.4.2. Componentes del balance de energía

a. Metodología SEBAL

La estimación de la evapotranspiración mediante del modelo SEBAL consiste en estimar las componentes del balance de energía como la R_n , G , H , ET de forma distribuida para el área de estudio, empleando el model builder del software ARCGIS 10.3.

• Radiación Neta (R_n)

El cálculo de la radiación neta R_n se basa en la ecuación (3), donde la $R_{S\downarrow}$ se calcula de la siguiente ecuación:

$$R_{S\downarrow} = G_{SC} \cdot \cos\theta \cdot dr \cdot \tau_{sw} \quad (8)$$

Donde: G_{SC} es la constante solar (1367 W m^{-2}), θ es el ángulo de incidencia solar y dr es el inverso del cuadrado de la distancia entre la tierra - sol. Además, τ_{sw} , ecuación (9) es la transmisividad atmosférica, la cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot Z \quad (9)$$

Donde: Z es la elevación sobre el nivel del mar (msnm) o el modelo digital de elevación (MDE). Para la radiación de onda larga incidente y emitida, los valores de $RL\uparrow$ y $RL\downarrow$, ecuación (10) y (11) se calculan utilizando la ecuación de Stefan – Boltzmann:

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (10)$$

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (11)$$

Donde: ε_0 , es la emisividad térmica de la superficie, σ es la constante de Stefan – Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$), T_s y T_a son temperatura superficial y ambiental (K) y ε_a , es la emisividad atmosférica efectiva, ecuación (13).

$$\varepsilon_0 = 0.95 + 0.01 IAF \quad (12)$$

$$\varepsilon_a = 0.85 \cdot (-\ln(\tau_{sw}))^{0.09} \quad (13)$$

- **El flujo de calor del suelo (G)**

Para el cálculo del flujo de calor del suelo, en el modelo SEBAL se aplicó la ecuación 14, (Bastiaanssen, 2000):

$$G = \frac{T_s - 273.15}{a} (0.0038a + 0.0074a^2)(1 - 0.98NDVI^4).Rn \quad (14)$$

Donde T_s es la temperatura superficial (K), a es el albedo superficial y NDVI es el índice de vegetación diferencia normalizada.

- **El flujo de calor sensible del aire (H)**

Para calcular el H , se utiliza una función aerodinámica ecuación(4), iniciando con el cálculo de la rugosidad de la superficie, la velocidad del viento y los rangos de temperatura de la superficie donde r_{ah} es la resistencia aerodinámica (s m-1) estimada en una primera iteración para condiciones de estabilidad atmosférica neutrales como:

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u_* \times k} \quad (15)$$

Donde: z_1 y z_2 son alturas sobre el desplazamiento del plano cero de la vegetación, k es la constante de von Karman (0.41) y u_* es la velocidad de fricción (m s-1), ecuación (16) la cual se calcula de la siguiente manera:

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

Donde u_{200} es la velocidad del viento a una altura de 200 m y Z_{om} es la longitud de rugosidad de impulso (m), ecuación (17). dT es la diferencia de temperatura entre el aire y la superficie. Se encontró una relación lineal entre el dT y la temperatura de la superficie que se aplica en las iteraciones ecuación (2). (Allen et al., 2011)

$$Z_{om} = 0.018 IAF \quad (17)$$

Donde a y b son coeficientes derivados por las iteraciones con base en dos pixeles anclas o pixeles extremos de frío y caliente.

El modelo SEBAL establece que en la selección del pixel frío y pixel caliente, se debe seleccionar los extremos de temperatura (t_{max} y t_{min}).

- **Flujo de calor latente (LE)**

El cálculo del flujo de calor latente (LE), se obtiene como el residuo de la ecuación ((1)).

b. Metodología METRIC

El algoritmo METRIC es muy similar al SEBAL por lo que presenta diferencia en el cálculo de algunas ecuaciones de los componentes del balance de energía.

- **Radiación Neta (R_n)**

Su cálculo en el modelo METRIC es igual al indicado por el modelo SEBAL. Ecuación (3).

- **El flujo de calor del suelo (G)**

Para el modelo METRIC se aplica la ecuación (18) y (19), la selección dependerá del IAF (Allen et al., 2011).

$$G = R_n(0.05 + 0.18e^{-0.521IAF}) \quad IAF \geq 0.5 \quad (18)$$

$$G = R_n \left(\frac{1.8(T_s - 273.15)}{R_n} + 0.084 \right) \quad IAF < 0.5 \quad (19)$$

- **El flujo de calor sensible del aire (H)**

METRIC aplica la misma ecuación del modelo SEBAL (ecuación (4)), sin embargo, la diferencia en esta etapa, radica al seleccionar el pixel frío, indicando que se debe identificar campos agrícolas homogéneos y seleccionar un subconjunto de pixeles fríos, dentro del rango $\pm 0.2K$ del promedio del 2% más frío, extraído del área de los valores del 5% más alto del NDVI. El NDVI es el promedio del 1% del 5% más alto. El EToF es el candidato del pixel frío en proporción a la cantidad de vegetación para períodos de NDVI bajos (ecuación 19), de lo contrario, se recomienda EToF_{frío} = 1.05 (alfalfa) (ecuación 20).

$$ET_o F_{cold} = 1.54 NDVI - 0.1 \quad de \quad NDVI < 0.75 \quad (20)$$

$$ET_o F_{cold} = 1.05 \quad (21)$$

Al seleccionar el pixel caliente, se debe identificar suelos desnudos homogéneos, que estén dentro del $\pm 0.2K$ del promedio del 2% más caliente, extraído del área del 10% más bajos del NDVI. El NDVI en el pixel caliente es su promedio del 10% más bajo. Se selecciono un píxel en función de la proximidad del valor promediado y la homogeneidad entre sus píxeles vecinos. Al tener ubicado cada pixel se extrae sus atributos y se inicia la iteración para la calibración del dt.

- **Flujo de calor latente (LE)**

El cálculo del LE en METRIC, es igual al modelo SEBAL, aplicando la ecuación (1).

3.4.3. Evapotranspiración del cultivo

a. Metodología SEBAL

El modelo SEBAL, estima la evapotranspiración diaria mediante la siguiente ecuación (22).

$$ET_{24} = \frac{(86400 \times \Lambda \times (Rn_{24} - Go_{24}))}{\lambda} \quad (22)$$

Donde: Λ es la fracción de evapotranspiración, Rn_{24} es la radiación neta diaria, Go_{24} es el flujo de calor el suelo diario, λ es el Calor latente de vaporización se expresa en $J \text{ Kg}^{-1}$, representa el calor absorbido cuando un kilogramo de agua se evapora:

$$\lambda = [2.501 - 0.00236(T_s - 273.15)] \times 10^6 \quad (23)$$

Para la radiación neta diaria, se calcula con la siguiente ecuación, con la aplicación restringida a cielos despejados.

$$Rn_{24} = (1 - a) \times Ra_{24} \times \tau_{sw} - 110 \times \tau_{sw} \quad (24)$$

Donde: Ra_{24} es la insolación diaria, τ_{sw} es la transmisividad, a es el albedo superficial.

Para la insolación diaria es la integral de la radiación entrante neta (incluyendo onda corta y onda larga) y se calcula con la siguiente ecuación:

$$Ra_{24} = G_{sc} \times d_r \times \int_{w_1}^{w_2} \cos(\theta) dw \quad (25)$$

Donde: G_{sc} Es la constante solar igual a 1367 W/m^2 , d_r es el inverso del cuadrado de la razón entre la distancia media y actual entre el sol y la tierra. w_2, w_1 Corresponden a los ángulos de salida y puesta del sol.

Para la fracción evaporativa que representa el porcentaje de energía que se evapora, con respecto a la energía disponible para evaporarse.

$$\Lambda = \frac{Rn - G - H}{Rn - G} = \frac{LE}{Rn - G} \quad (26)$$

Donde: LE es el flujo de calor latente, Rn es la radiación neta instantánea, G es flujo de calor de suelo.

b. Metodología METRIC

El modelo METRIC estima la evapotranspiración diaria, indicando la estimación de la ET instantánea (ET_{inst}), el valor de la ET se calcula en mm h^{-1} a partir de la siguiente ecuación:

$$ET_{inst} = 3600 \frac{LE}{\lambda} \quad (27)$$

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

La fracción de ET de referencia (EToF) se calcula de la relación entre la ET instantánea (ET_{inst}) de cada píxel y la ET de referencia (ET_o) calculada a partir de la información meteorológica recopilada, estableciendo como único valor en todos los pixeles, ecuación (28) (Allen, Tasumi, & Trezza, 2007).

$$ET_oF = \frac{ET_{inst}}{ET_o} \quad (28)$$

Donde: ET_o es la ET de referencia para la alfalfa de 0.5 m de alto para el tiempo de la imagen. La ET_o fue calculada por el método de Penman Monteith (mm h-1), extraída de la estación meteorológica automática. ET_oF es similar al coeficiente del cultivo (Kc).

El modelo METRIC calcula la ET_{24} del producto de la ET_oF con la ET_{o-24} , siendo este ultimo la que es la sumatoria de las ET_o de cada hora del día (Allen et al., 2007a):

$$ET_{24} = ET_oF \times ET_{o-24} \quad (29)$$

El procedimiento secuencial desde la adquisición de las imágenes hasta el resultado de la ET_c se resume en la Figura 13.

Metodologia Metric

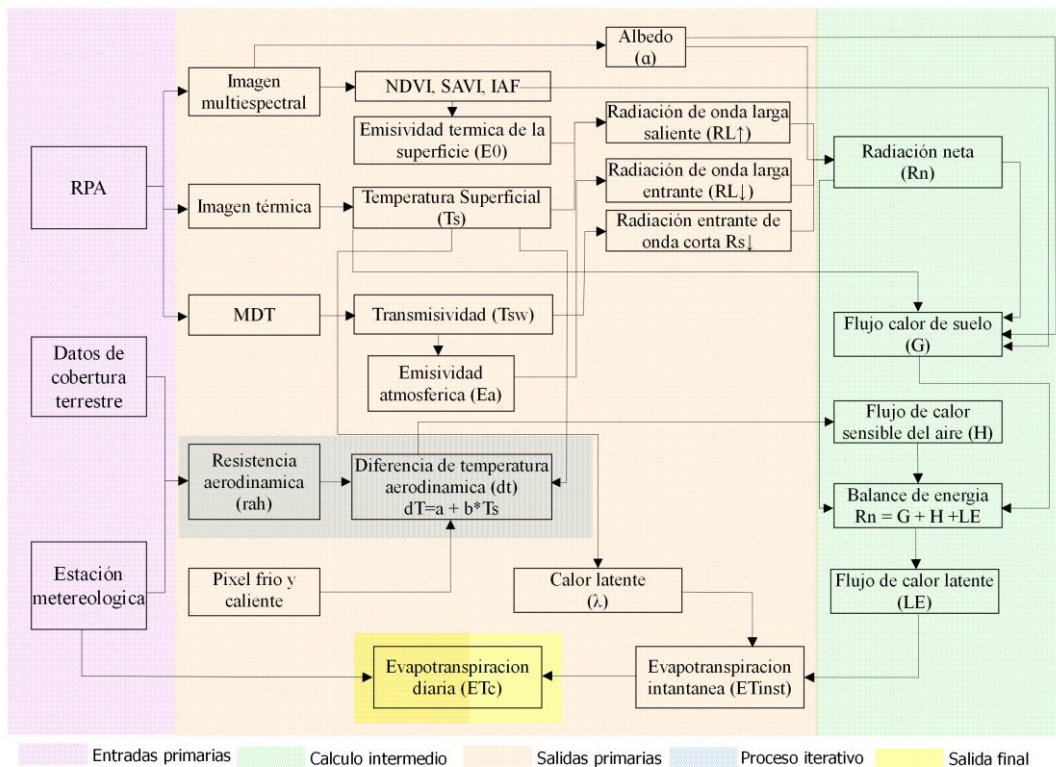


Figura 13: Procedimiento secuencial para estimar la evapotranspiración del cultivo por balance de energía

FUENTE: Adaptada de Numata et al. (2017).

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. ÍNDICES DE VEGETACION (NDVI, IAF) y ALBEDO

4.1.1. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

En la Figura 14 se observa la relación lineal entre el NDVI calculado a partir de imágenes multiespectrales y el sensor Green Seeker, obteniéndose un coeficiente de correlación de Pearson (R) de 0,90, coeficiente de determinación (r^2) de 0,80, ecuación $y = 0,7619x + 0,1414$, relación que se empleó en la calibración del NDVI.

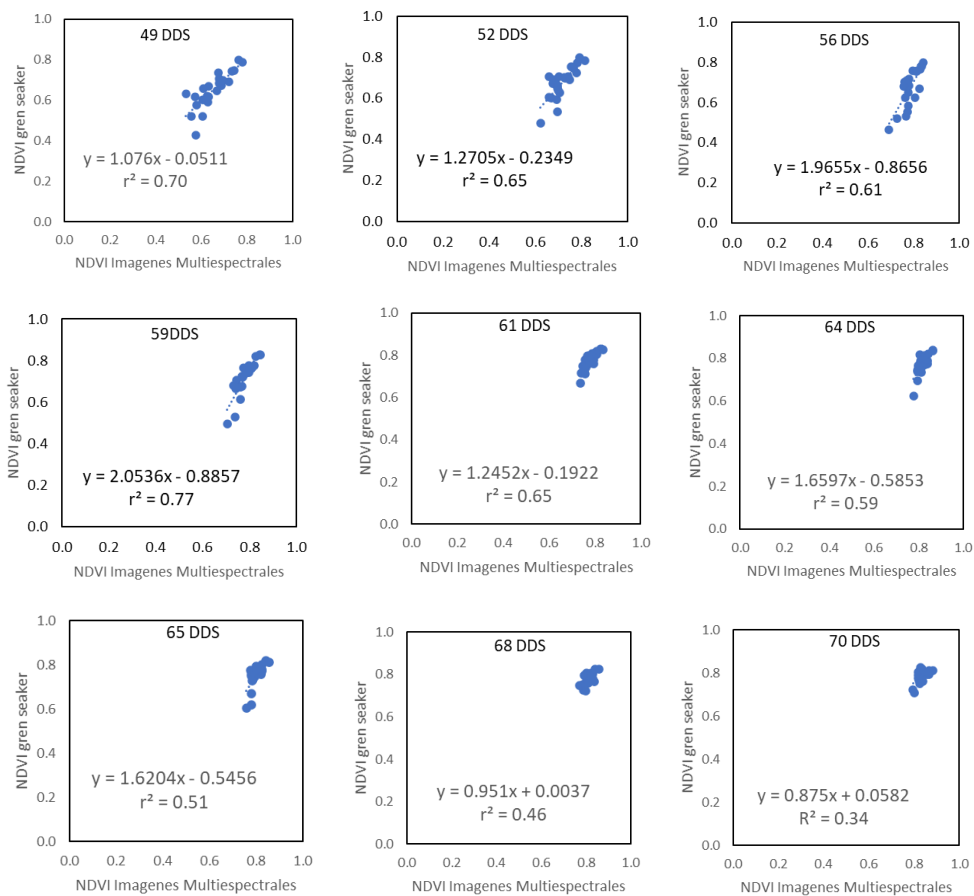


Figura 14: Relación entre el NDVI obtenido a partir de imágenes multiespectrales de RPA y el sensor Green Seeker

Con el NDVI ajustado con información de campo, se obtuvo la variación espacial, como se observa en la Figura 15, presentan valores ($\bar{x} \pm S$) de $(0,57 \pm 0,21)$ en E1 y $(0,46 \pm 0,22)$ en E2. Respecto a los valores mínimos y máximos estos varían de $(0,12-0,84)$ en E1 y $(0,16-0,83)$ en E2. Según Lee & Kim, (2016), obtuvieron valores de NDVI en verano (Korea del sur) que oscila entre de 0.8 a 0.85; coincidiendo con lo obtenido en la investigación.

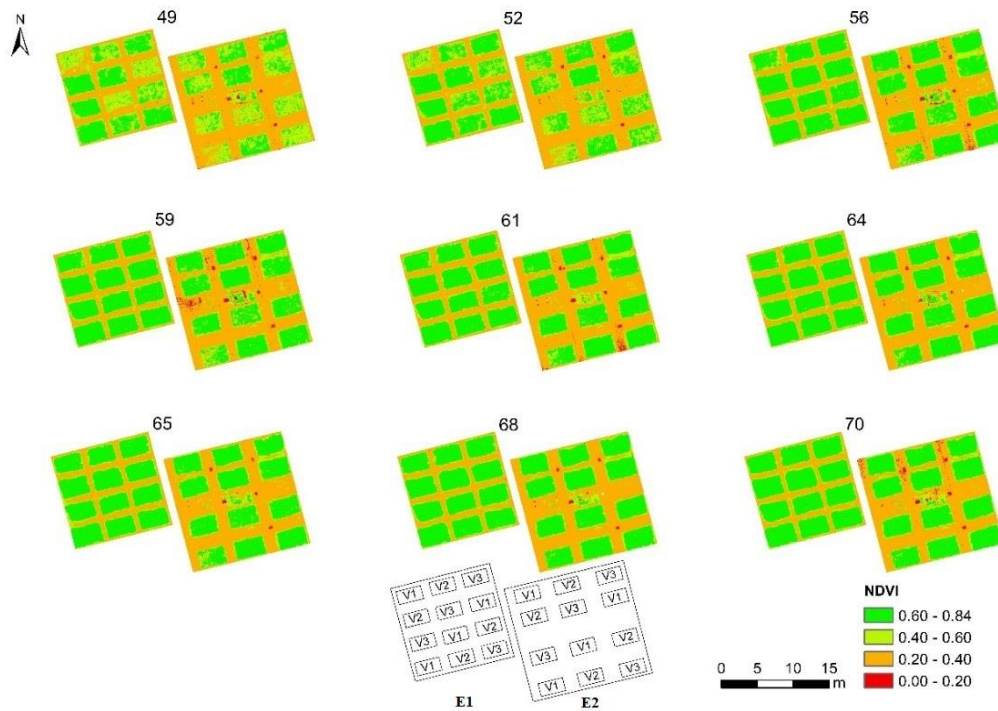


Figura 15: Distribución espacial del NDVI en el cultivo de arroz según DDS en la campaña agrícola 2019 en la Molina

4.1.2. Índice de área foliar (IAF)

En la Figura 16 se muestra la relación lineal entre el NDVI de RPA y el IAF de un ceptometro, obteniéndose un coeficiente de correlación de Pearson (R) de 0,83, 0,85, 0,62, 0,62; coeficiente de determinación (r^2) de 0,70, 0,76, 0,62, 0,62; y siguientes ecuaciones $y=0,0355e^{5,2823x}$, $y=0,0149e^{6,2997x}$, $y=0,0071e^{6,8187x}$ e $y=0,0014e^{8,7907x}$; que se emplearon en la obtención del IAF.

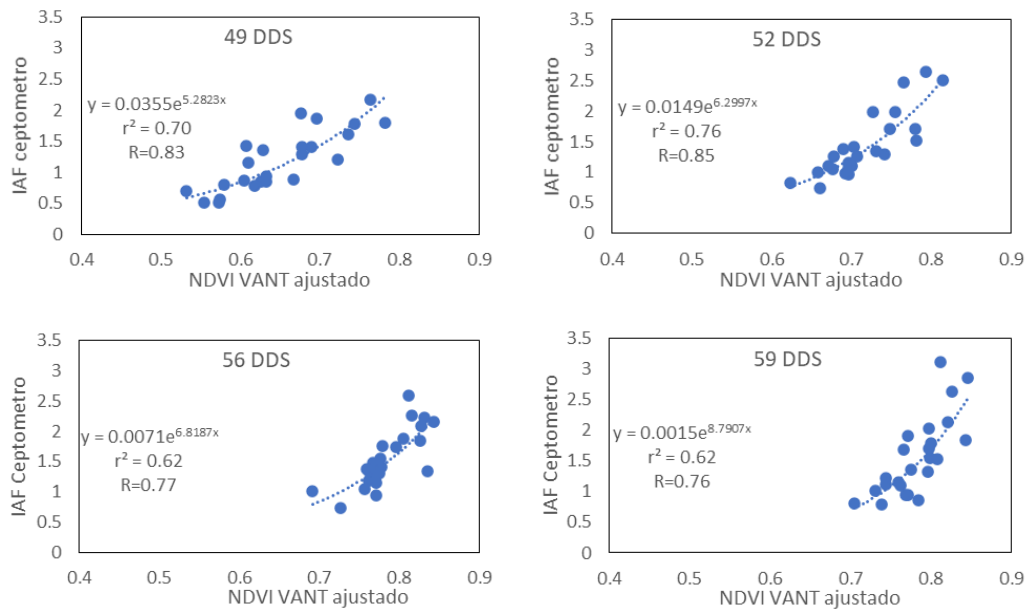


Figura 16: Relación del NDVI obtenido de RPA e IAF medido con un ceptometro

Con la relación de IAF y NDVI, se obtuvo la variación espacial del IAF, como se observa en la Figura 17, con valores ($\bar{x} \pm S$) de $(1,05 \pm 0,94)$ en E1 y $(0,66 \pm 0,81)$ en E2. Respecto a valores mínimos y máximos $(0,01-0,76)$ en E1 y $(0,01-3,39)$ en E2.

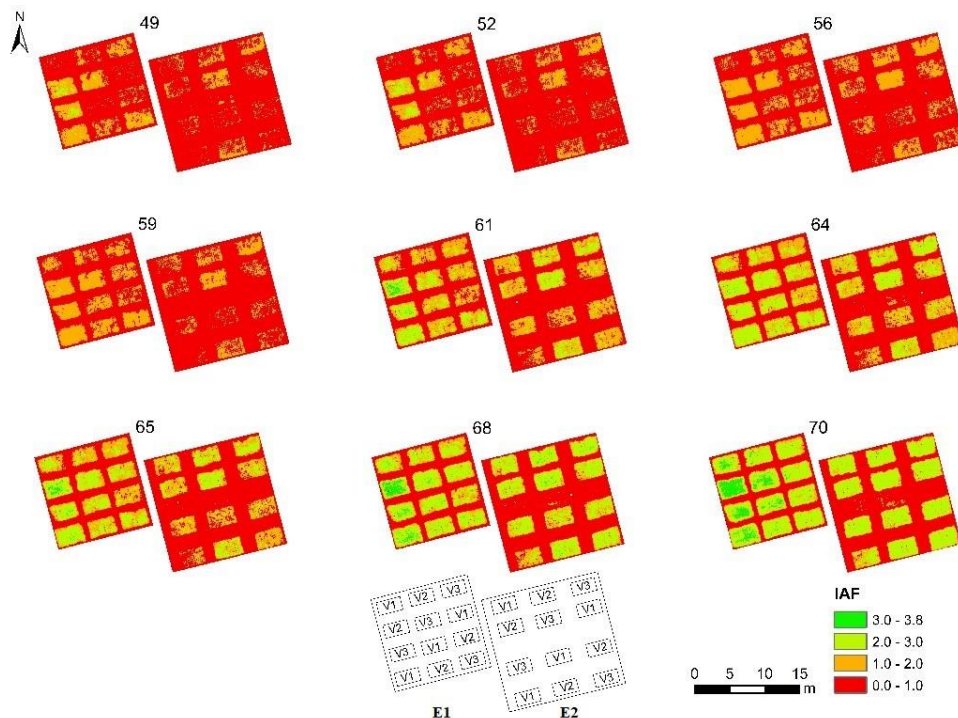


Figura 17: Distribución espacial del IAF en el cultivo de arroz según DDS en la campaña agrícola 2019 en la Molina

4.1.3. Albedo

En la Figura 18 se muestran los valores del albedo de forma espacial con valores ($\bar{x} \pm S$) de $(0,20 \pm 0,04)$ en E1 y $(0,23 \pm 0,04)$ en E2. Respecto a valores mínimos y máximos $(0,031-0,50)$ en E1, $(0,07-0,60)$ en E2, estos rangos de valores toman cobertura de suelo y vegetación. En la Tabla 3 se observa que los valores de albedo; que corresponde a los píxeles fríos, o a la vegetación, son coincidentes con los de la FAO indicando que una cobertura verde de vegetación tiene un albedo de 0,20 a 0,25. Para Lee & Kim, (2016) los valores del albedo aumentan en invierno, bajo ese contexto estos resultados no son influenciados a un aumento, porque se realizó en época de verano.

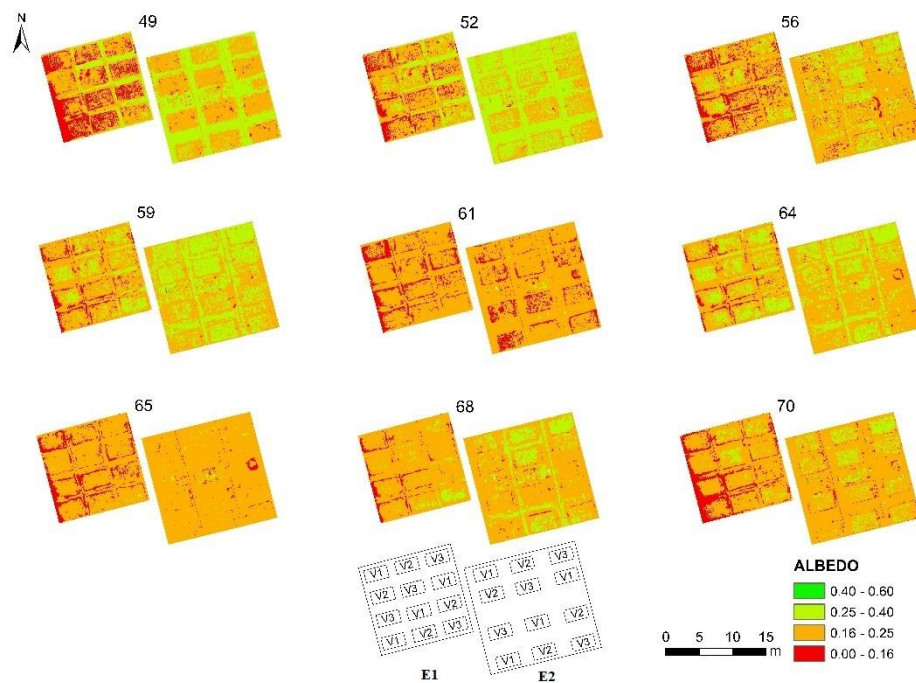


Figura 18: Distribución espacial de albedo en el cultivo de arroz según DDS en la campaña agrícola 2019 en la Molina

4.1.4. Temperatura superficial (Ts)

En la Figura 19 se observa la relación lineal entre la temperatura de imagen térmica y la temperatura del follaje (termopar en °C), obteniéndose un coeficiente de correlación de Pearson (R) de 0,76, coeficiente de determinación (r^2) de 0,58, ecuación $y = 0,6329x + 11,598$, relación que se empleó en la calibración de la temperatura.

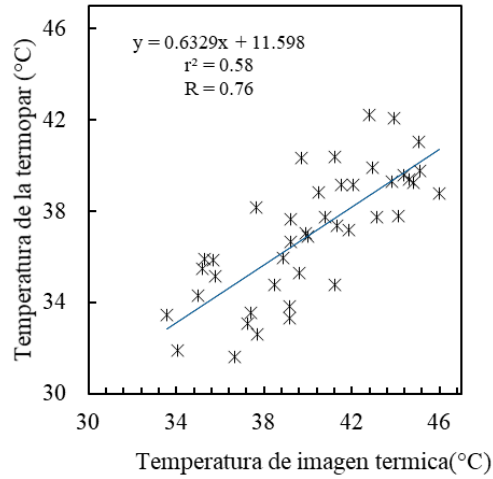


Figura 19: Diagrama de dispersión de la temperatura de imagen térmica (°C) y la temperatura del termopar (°C)

En la Figura 20 se muestran los valores de temperatura superficial de forma espacial con valores ($\bar{x} \pm S$) de (311,99±6,76) en E1, (316,49±7,25) en E2. Respecto a valores mínimos y máximos (301,47-61,65) en E1, (294,46-60.89) en E2.

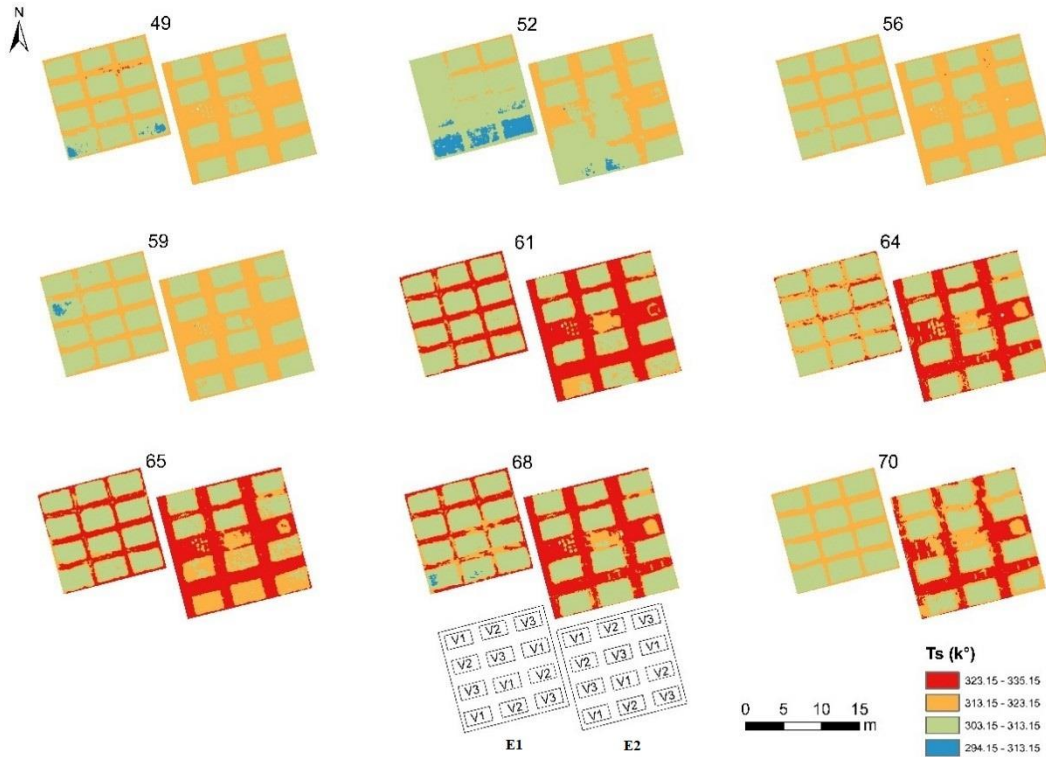


Figura 20: Distribución espacial de la temperatura superficial (Ts) según DDS en la campaña agrícola 2019 en la Molina

4.2. COMPONENTES DEL BALANCE DE ENERGÍA

4.2.1. Radiación neta (Rn)

En la Figura 21 se muestran los valores de Rn de forma espacial los experimentos presentan valores ($\bar{x} \pm S$) de $658,35 \pm 62,06 \text{ W m}^{-2}$ (E1), $619,18 \pm 59,27 \text{ W m}^{-2}$ (E2). Para Lee & Kim, (2016), con información de imágenes del satélite MODIS ; la Rn oscilo entre de 400 a 800 W m^{-2} , indicando que sus valores sobreestiman aproximadamente 100 W m^{-2} , pero Montibeller et al. (2017), que emplearon imágenes de RPA, la Rn varió desde 427,24 a $688,76 \text{ W m}^{-2}$, con un RMSE de $6,09 \text{ W m}^{-2}$, notándose que los resultados están dentro del rango de cada uno.

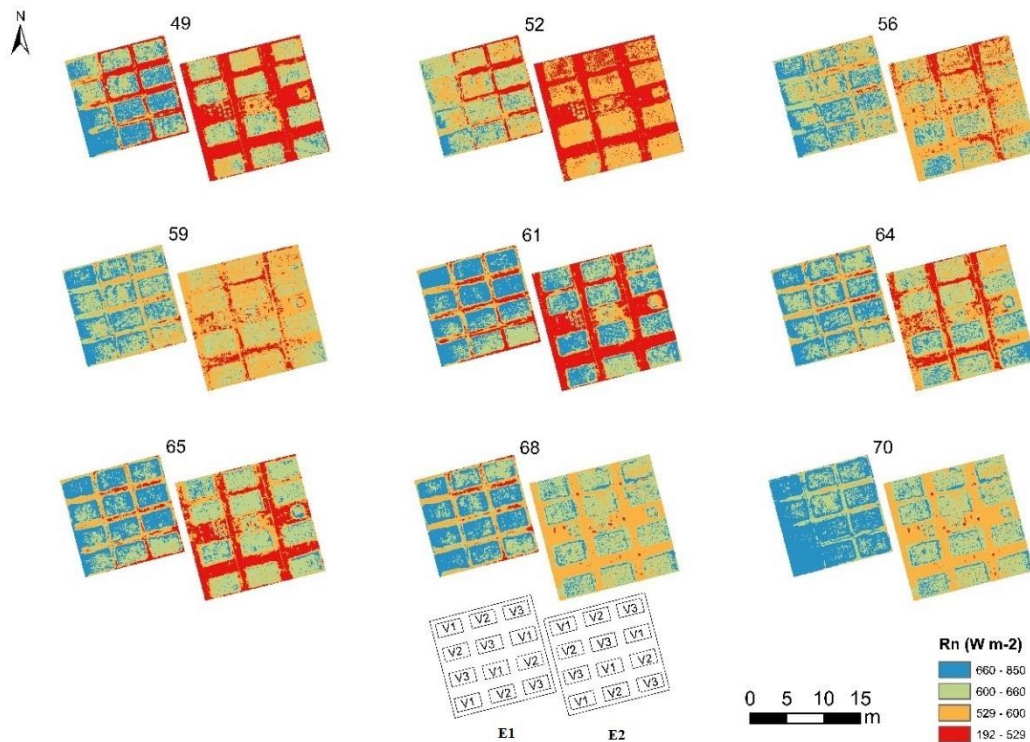


Figura 21: Distribución espacial de la radiación neta (Rn) del balance de energía en el modelo METRIC en el cultivo de arroz

4.2.2. Flujo de calor de suelo (G)

En la Figura 22 se muestra la variación espacial de G, del modelo SEBAL, los experimentos presentan valores ($\bar{x} \pm S$) de $83,65 \pm 28,92 \text{ W m}^{-2}$ (E), $85,17 \pm 27,25 \text{ W m}^{-2}$ (T2).

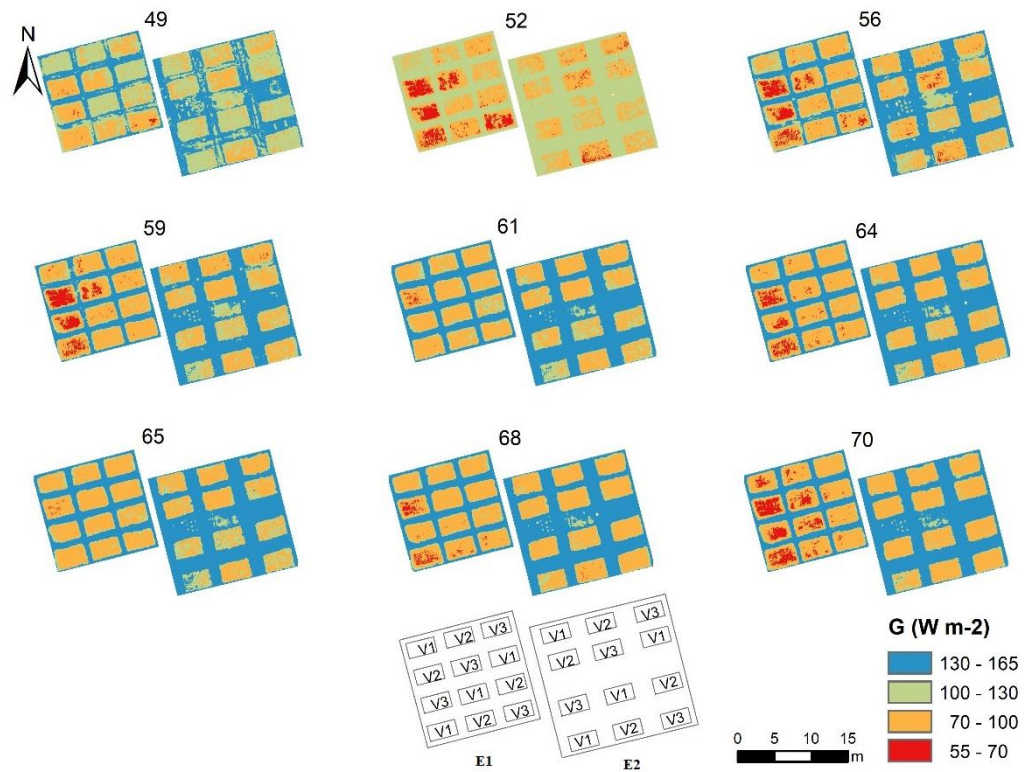


Figura 22: Distribución espacial del flujo del Calor del Suelo (G) del balance de energía en el modelo SEBAL en el cultivo de arroz

En la Figura 23 se muestra la variación espacial de G, del modelo METRIC, los experimentos presentan valores ($\bar{x} \pm S$) de $83,73 \pm 27,59 \text{ W m}^{-2}$ (E1), $85,17 \pm 26,81 \text{ W m}^{-2}$ (E2) siendo los valores de E1 cercanos a los obtenidos por Lee & Kim (2016,) que representa un incremento del 8% entre experimentos. Para Lee & Kim. (2016), en un día bien regado y despejado en un arrozal, el flujo de calor del suelo encontró en el rango de 0 a 100 W m^{-2} . Nuestros valores están cercanos del rango mencionado, es posible que varios factores podrían afectar los valores de G, como, la calidad de las imágenes de RPA, la distribución espacial del albedo en la superficie y las diferentes condiciones climáticas (Montibeller et al., 2017).

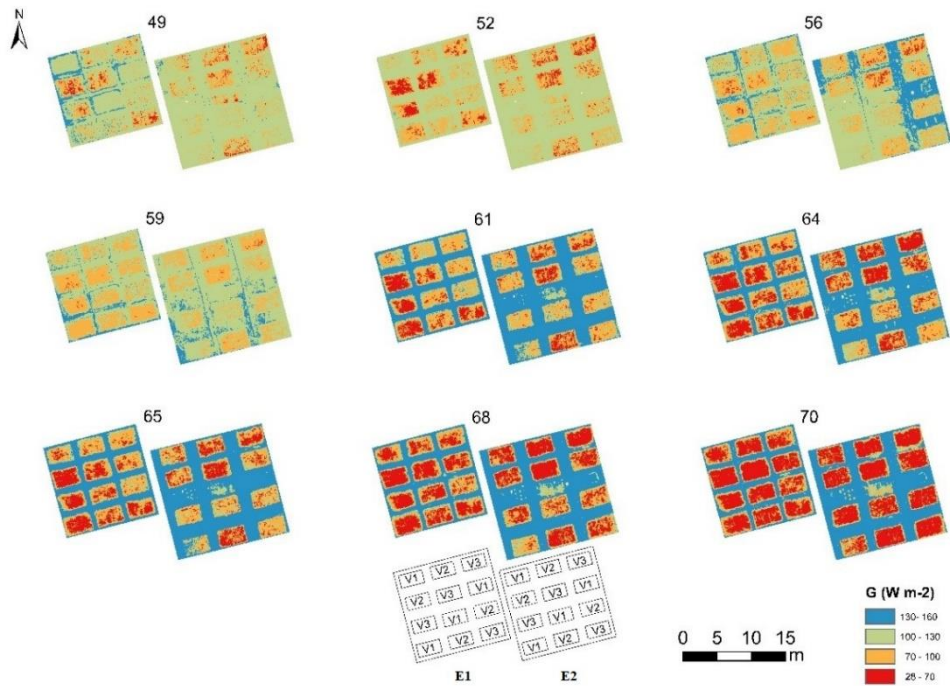


Figura 23: Distribución espacial del flujo del Calor del Suelo (G) del balance de energía en el modelo METRIC en el cultivo de arroz

4.2.3. Flujo sensible del aire (H)

En la Figura 24, se observa la variación de la diferencia de la temperatura para la estimación de coeficientes a y b, a partir de la selección de pixel frío y caliente para el cálculo del flujo de calor del aire.

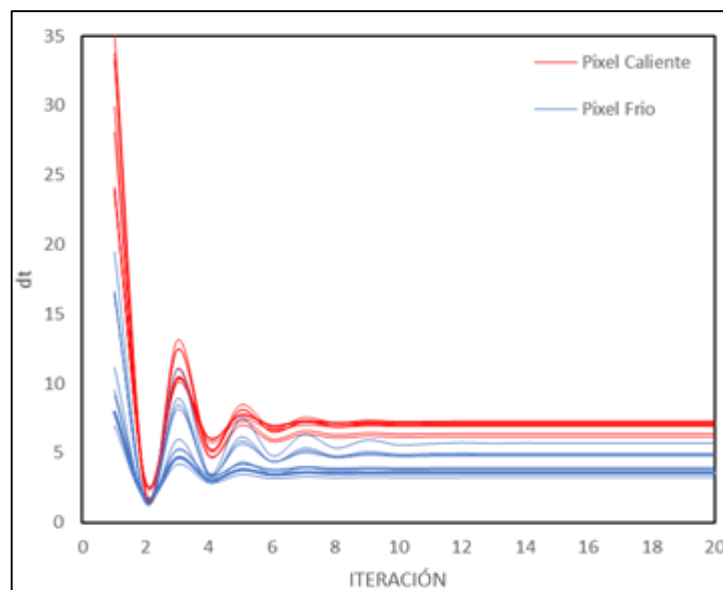


Figura 24: Variación de la diferencia de la temperatura cerca de la superficie (dt) para la estimación del coeficiente a y b en la selección del pixel frío y caliente en el cálculo de flujo de calor del aire (H)

En la Tabla 3 se muestra el resumen, del valor de las variables seleccionadas en función al pixel frío y caliente, como la determinación de a y b, para ambas fechas de vuelo.

En la Figura 25 se observa la ubicación del pixel frío y caliente para el día 70 DDS, obteniéndose para (Ts) mínima de 306,2 K, valores máximos de NDVI de 0.84, IAF de 3.35 y un albedo superficial 0.23. El pixel caliente con una temperatura superficial (Ts) máxima de 326,4 K, un valor mínimo de NDVI de 0.225 y un IAF de 0.15. estos resultados se obtuvieron aplicando la metodología indicada por Allen et al (2013), sin embargo, (Bhattarai et al., 2017) mejoro la selección, a partir de un algoritmo de búsqueda exhaustiva involucrando mayor cantidad de pixeles candidatos relacionando el NDVI y la Ts.

Tabla 3: Selección del píxel frío y caliente en cada vuelo de RPA para los valores de NDVI, albedo, temperatura y las constantes de calibrado

Fecha	Píxel	Coordenadas (WGS84, UTM)						
		X	Y	NDVI	Albedo	T(K)	a	b
14-Ene	P. Frío	288171.48	8664022.83	0.797	0.24	304.3	0.18262922	-52.0820479
	P. Cal.	288165.38	8664034.78	0.218	0.31	317.3		
17-Ene	P. Frío	288171.06	8664023.41	0.730	0.21	302.2	0.10826029	-28.1242713
	P. Cal.	288189.63	8664040.06	0.218	0.26	317.3		
21-Ene	P. Frío	288159.15	8664028.21	0.811	0.23	306.0	0.21663159	-61.8456939
	P. Cal.	288196.85	8664032.31	0.214	0.20	316.9		
24-Ene	P. Frío	288158.15	8664027.38	0.809	0.24	303.0	0.07700179	-17.9820797
	P. Cal.	288192.89	8664029.05	0.217	0.24	321.7		
26-Ene	P. Frío	288158.18	8664028.03	0.803	0.20	305.8	0.12899859	-36.1206195
	P. Cal.	288171.63	8664021.58	0.213	0.21	334.0		
29-Ene	P. Frío	288159.75	8664019.66	0.798	0.24	304.0	0.08842006	-22.0331495
	P. Cal.	288188.68	8664041.84	0.228	0.24	327.1		
30-Ene	P. Frío	288159.86	8664028.25	0.820	0.23	307.4	0.15645095	-45.0944471
	P. Cal.	288193.20	8664027.86	0.214	0.21	332.8		
2-Feb	P. Frío	288159.99	8664020.81	0.793	0.21	303.3	0.12040279	-32.8097708
	P. Cal.	288200.36	8664045.98	0.215	0.24	330.4		
4-Feb	P. Frío	288159.10	8664027.40	0.835	0.23	306.2	0.07882497	-18.5709556
	P. Cal.	288203.59	8664030.64	0.225	0.20	326.4		

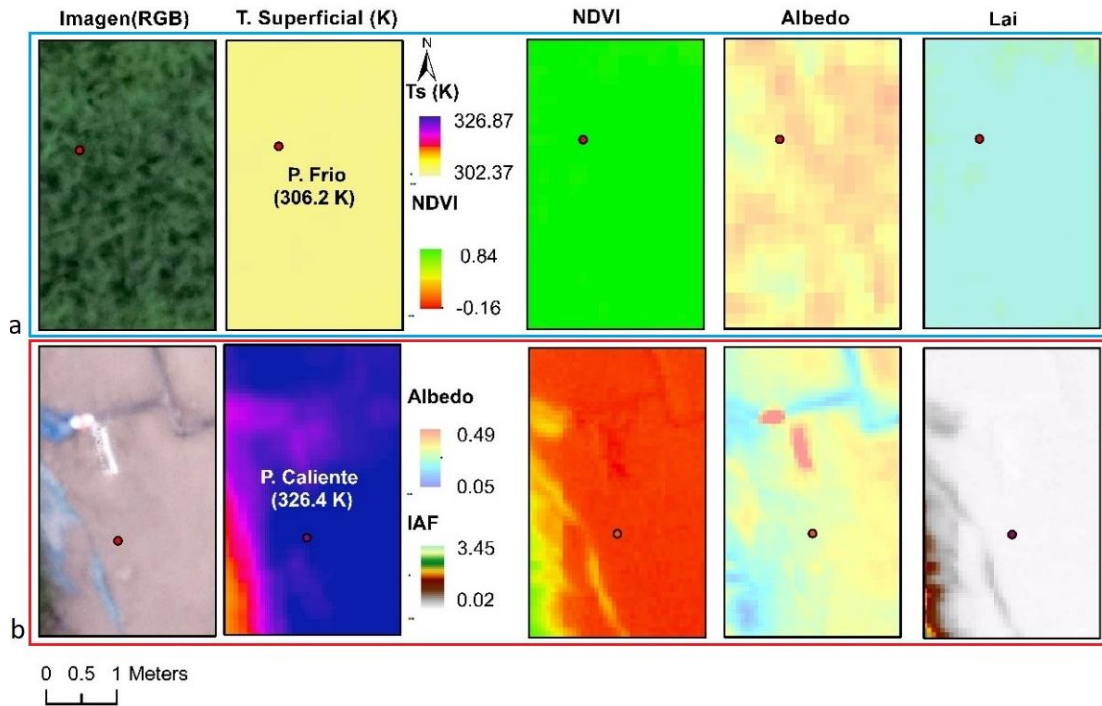


Figura 25: Ubicación del pixel promedio frío (a) y caliente (b) en la imagen RGB, Ts, NDVI, Albedo y IAF, durante la fase de macollamiento del cultivo de arroz (70 DDS)

En la Figura 26 se muestran la variación espacial del H del modelo SEBAL, en el que se obtienen valores ($\bar{x} \pm S$) de $308,46 \pm 54,34 \text{ W m}^{-2}$ (E1); $326,79 \pm 53,78 \text{ W m}^{-2}$ (E2).

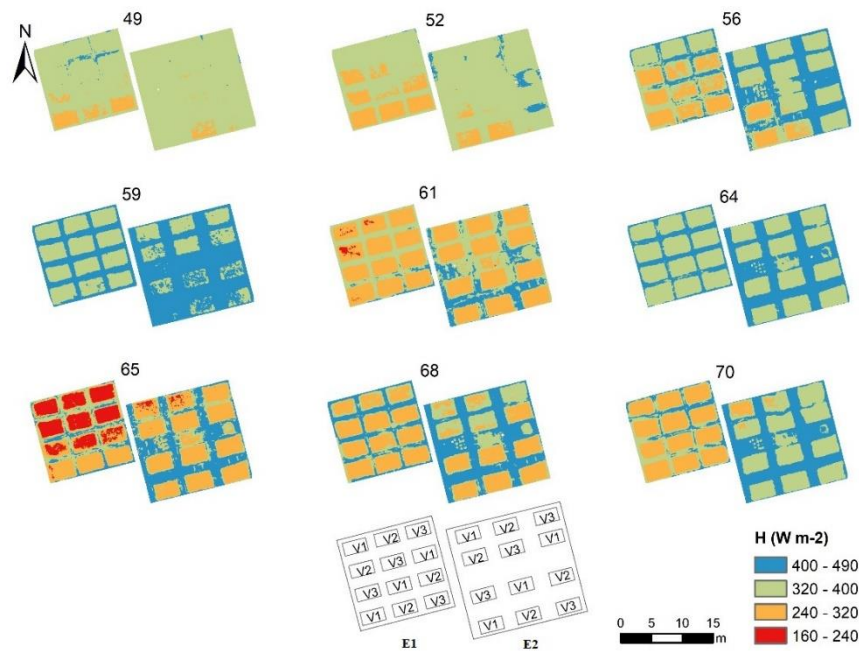


Figura 26: Distribución espacial del flujo del calor sensible del aire (H) del balance de energía en el modelo SEBAL en el cultivo de arroz

En la Figura 27 se muestran la variación espacial del H, del modelo METRIC en el que se obtienen valores ($\bar{x} \pm S$) de $340,83 \pm 75,26 \text{ W m}^{-2}$ (E1); $359,46 \pm 77,66 \text{ W m}^{-2}$ (E2). Estos valores están muy cercanos a los obtenidos por Lee & Kim (2016) cuyo rango fue de 50 a 400 W m^{-2} en arrozales.

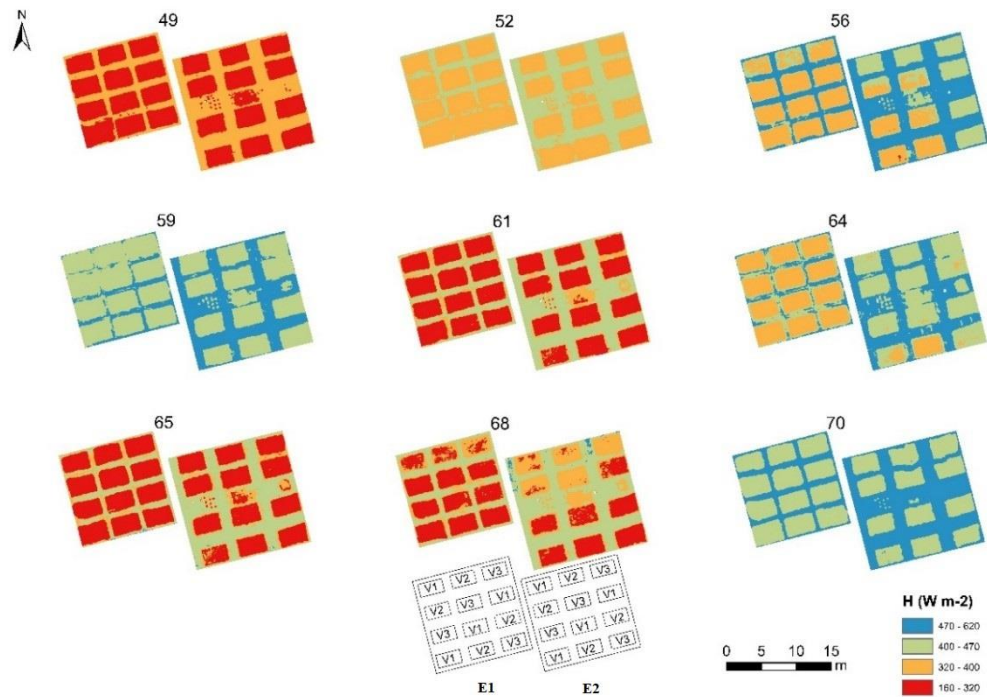


Figura 27: Distribución espacial del flujo del calor sensible del aire (H) del balance de energía en el modelo METRIC en el cultivo de arroz

4.2.4. Flujo de calor latente (LE)

En la Figura 28 se muestra los valores del LE de forma espacial del modelo SEBAL, los experimentos presentan valores ($\bar{x} \pm S$) de $264,82 \pm 124,18 \text{ W m}^{-2}$ (E1); $207,33 \pm 127,00$ (E2). y valores mínimos y máximos de (0,00-487,75) en E1; (0,00- 381,95) en E2.

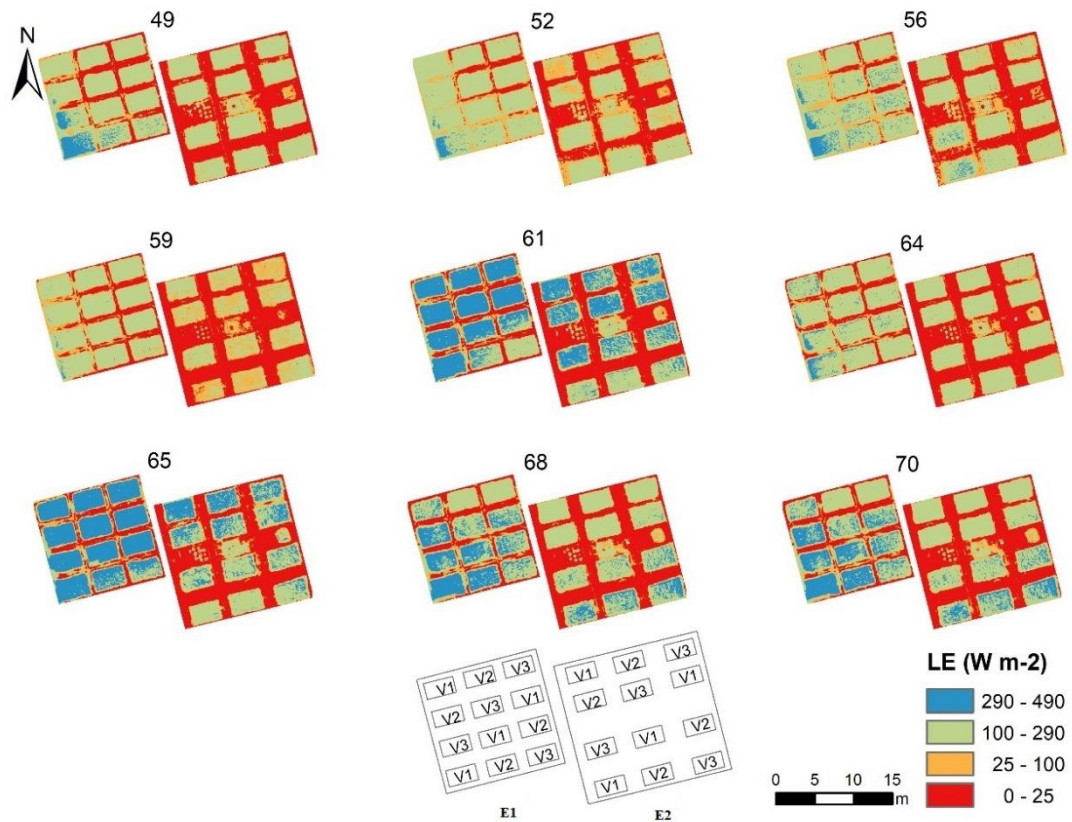


Figura 28: Distribución espacial del flujo del calor latente (LE) del balance de energía en el modelo SEBAL en el cultivo de arroz

En la Figura 29 se muestra los valores del LE de forma espacial, del modelo METRIC, los experimentos presentan valores ($\bar{x} \pm S$) de $233,79 \pm 101,10 \text{ W m}^{-2}$ (E1); $176,40 \pm 95,54$ (E2). y valores mínimos y máximos de (0,00-466,10) en E1; (0,00- 371,38) en E2. Estos valores pueden variar según la etapa del cultivo (Montibeller et al., 2017).

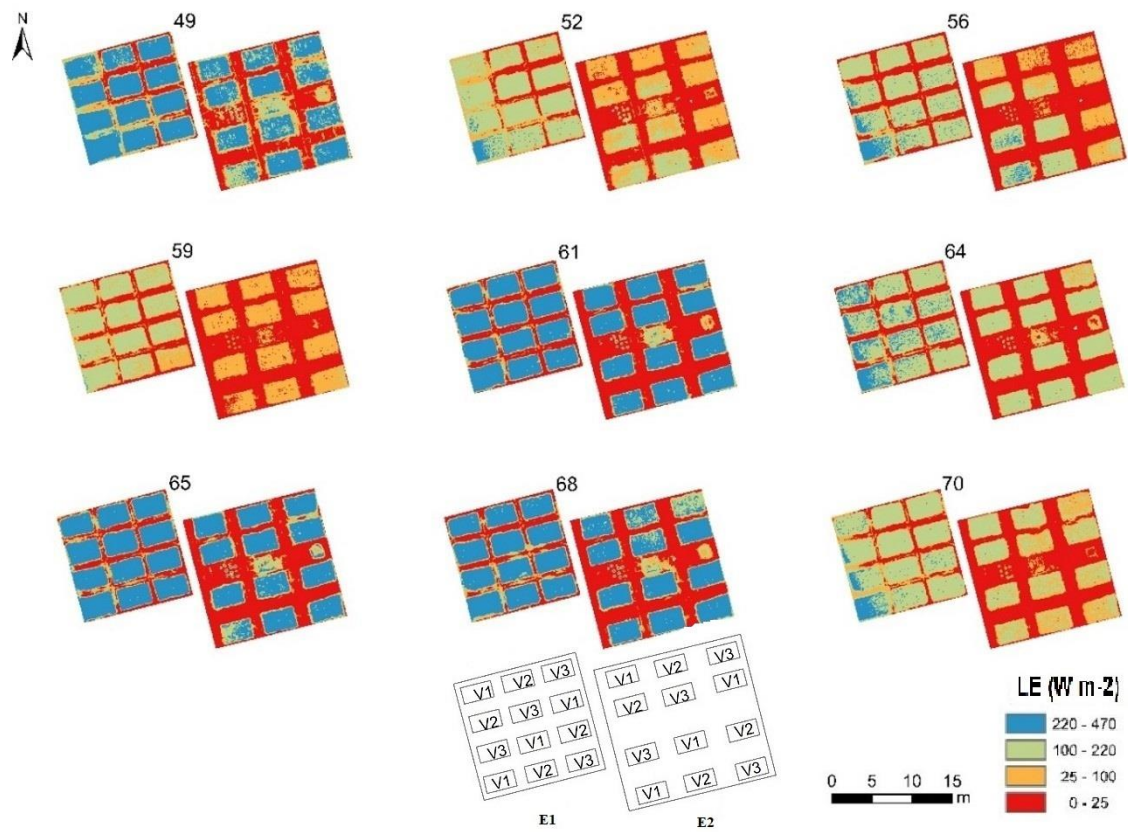


Figura 29: Distribución espacial del flujo del calor latente (LE) del balance de energía en el modelo METRIC en el cultivo de arroz

4.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO (ET_c)

En la Figura 30 se presenta la variación espacial de la ET_c, del modelo SEBAL, los experimentos presentan valores ($\bar{x} \pm S$) de [5,95 ± 1,14 (IR43), 5,63 ± 1,07 (IR71706), 5,36 ± 1,15 (Sahood Ulan 12)] en E1; [4,44 ± 1,31 (IR43), 4,48 ± 1,35 (IR71706), 4,45 ± 1,30 (Sahood Ulan 12)] en E2.

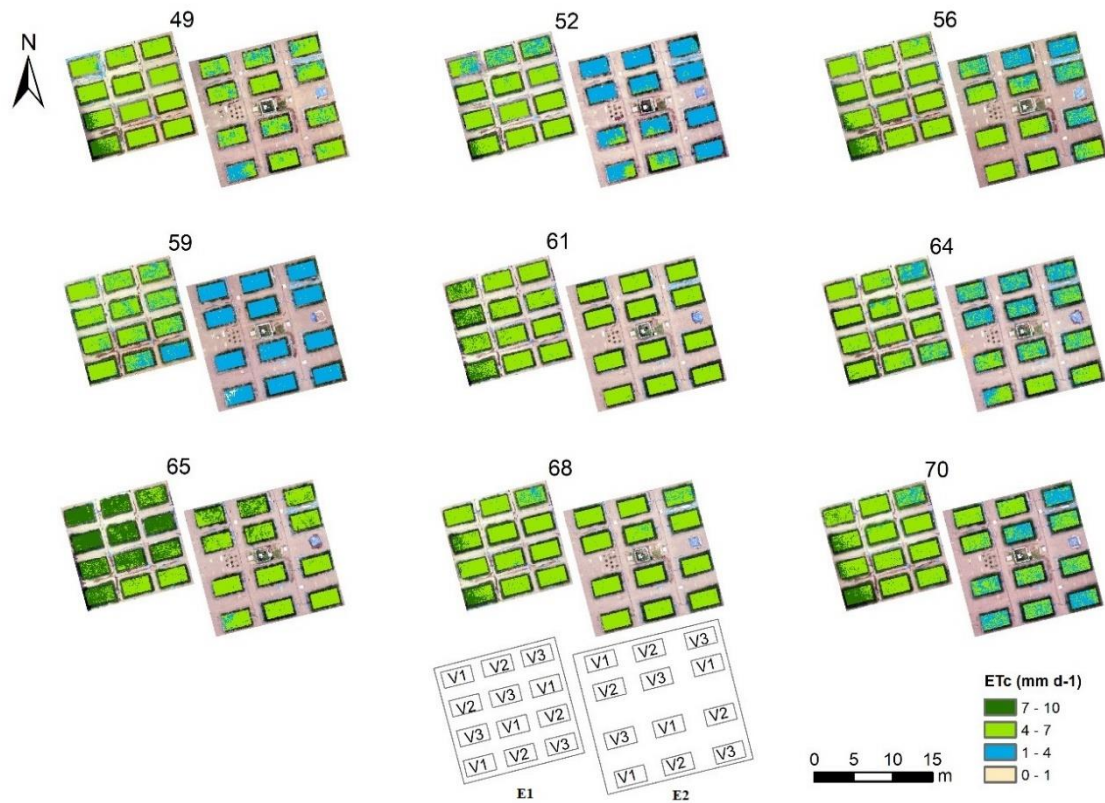


Figura 30: Distribución espacial de la evapotranspiración de cultivo (ETc) obtenida por balance de energía del modelo SEBAL en el cultivo de arroz

En la Figura 31 se presenta la variación espacial de la ETc, del modelo METRIC, los experimentos presentan valores ($\bar{x} \pm S$) de [2,38 \pm 1,01 (IR43), 2,24 \pm 0,97 (IR71706), 2,18 \pm 1,01 (Sahood Ulan 12)] en E1; [1,72 \pm 1,03 (IR43), 1,71 \pm 1,05 (IR71706), 1,73 \pm 1,05 (Sahood Ulan 12)] en E2;

Se realizó el análisis combinado de experimentos con análisis de varianza y Duncan con $p < 0.05$, observando en la y Tabla 8 (Anexo 4) que existe significancia entre experimentos pero sin significancia entre tratamientos para E1(Tabla 6) y E2 (Tabla 7).

En la Tabla 4 se resume los resultados de NDVI, IAF, Ts, Rn, G, H, LE, y los Etc mostrando los promedios de cada tratamiento y experimento.

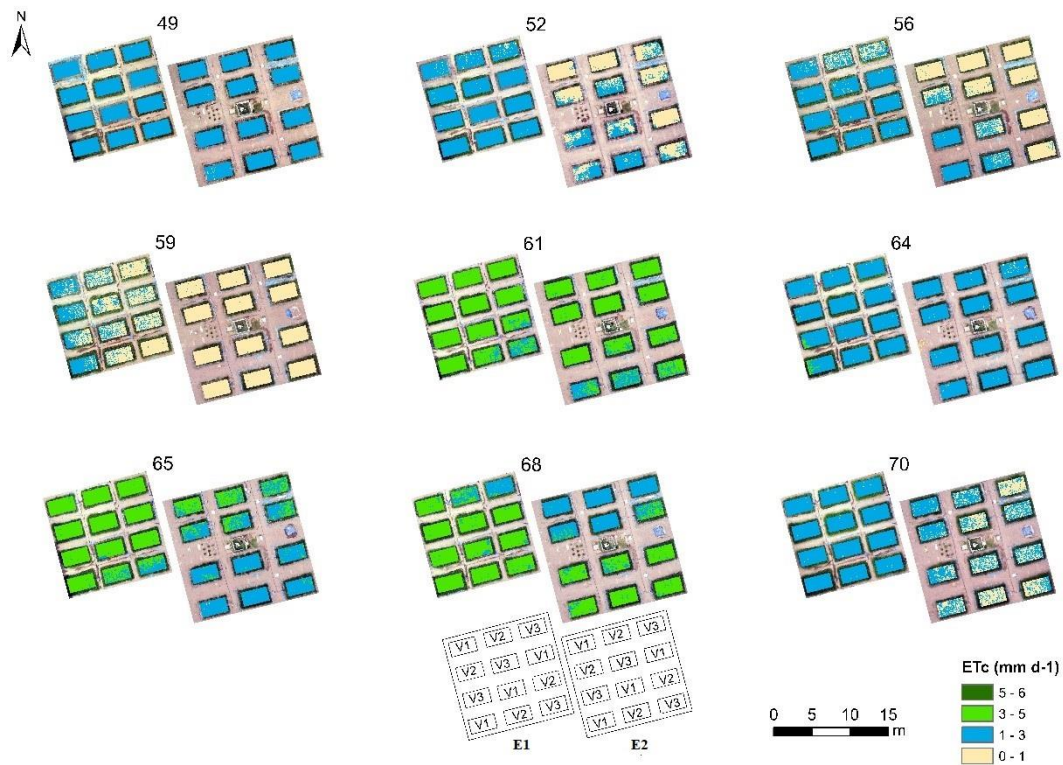


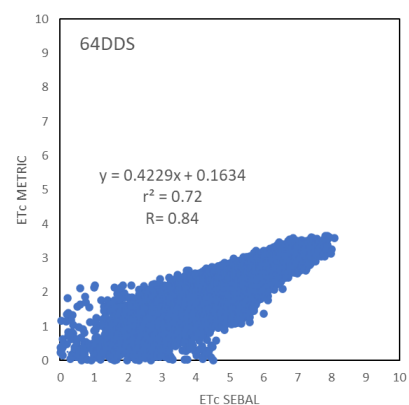
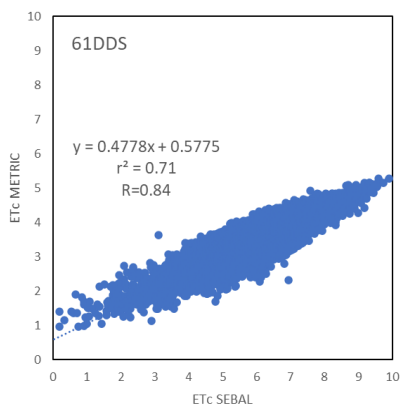
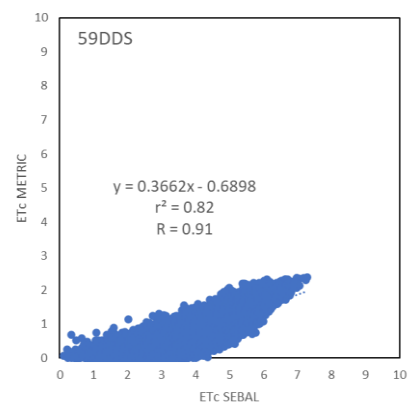
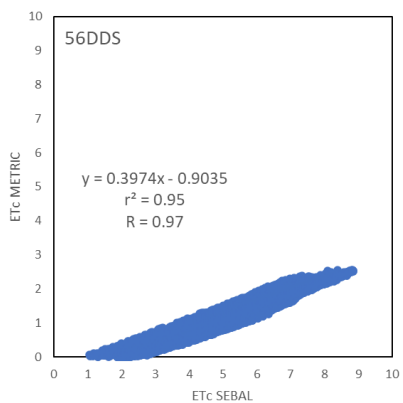
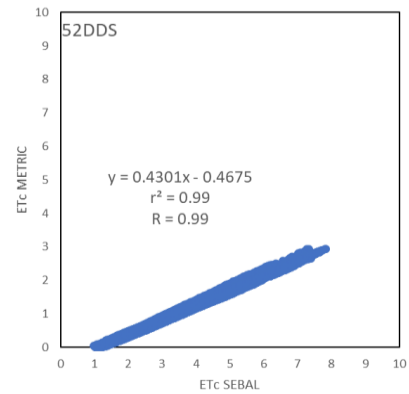
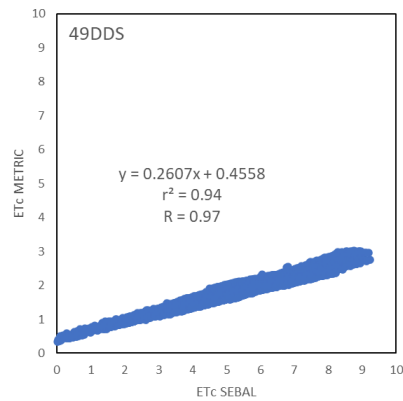
Figura 31: Distribución espacial de la evapotranspiración de cultivo (ETc) obtenida por balance de energía del modelo METRIC en el cultivo de arroz



Figura 32: Nivel de significancia estadística para la ETc (mm d-1), a) análisis por experimento; b) análisis por variedades en el experimento 1; d) análisis por variedades en el experimento 2

En la Figura 33, se compara la ETc obtenida con SEBAL y METRIC, obteniéndose un r^2 , 0,94 , 0,99, 0,95, 0,82, 0,71, 0,72, 0,84, 0,70, 0,83 y un R de 0,97, 0,99, 0,97, 0,91, 0,84, 0,84, 0,91, 0,84, 0,91; se observa que el método SEBAL es mayor en un 153% del modelo METRIC, indicando un mayor valor en un mismo píxel, esto debido a que el modelo METRIC realiza un ajuste interno al calcular la ETc a partir de los datos de la estación

meteorológica ubicada en el mismo campo de estudio. Al respecto, Zamani & Rahimzadegan (2018), Pascual (2018) y Schirmbeck et al (2017), concluyeron que el modelo METRIC representa mejor la ETc respecto a SEBAL. Además, Castañeda et al. (2018) y Folhes et al. (2009), obtuvieron que los valores de ETc con METRIC, eran cercanos a los obtenidos con la torre de covarianza Eddy. Por lo que, METRIC es una herramienta viable para estimar la variabilidad espacial y temporal de la ET y la eficiencia del uso del agua.



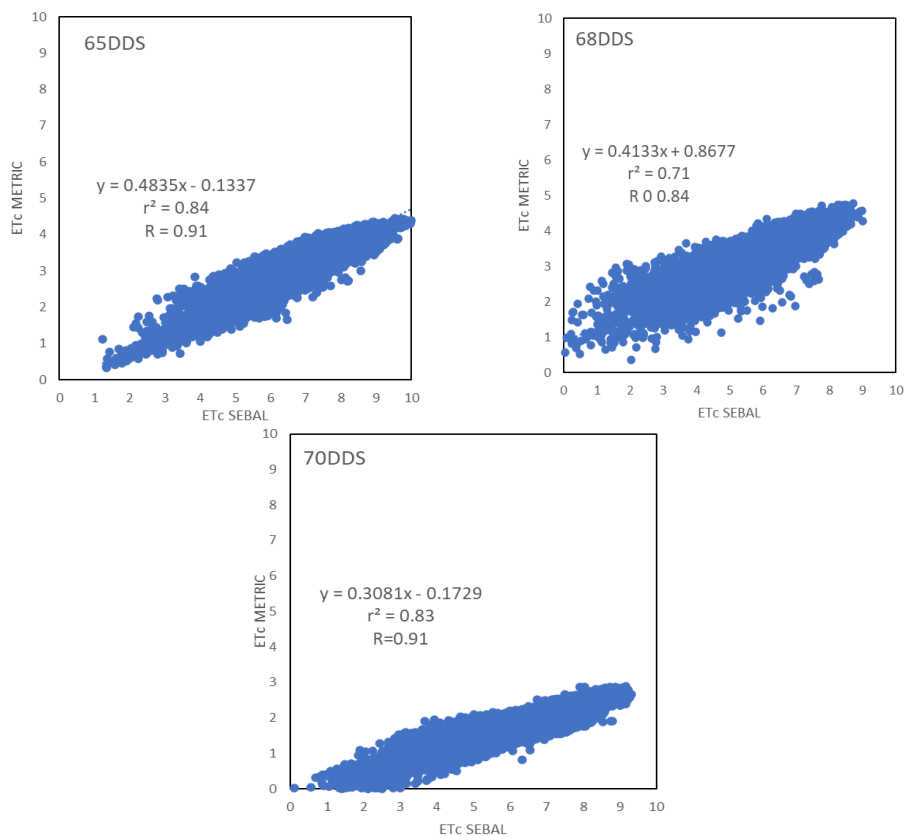


Figura 33: Evapotranspiración obtenida por el método METRIC y SEBAL

Los valores de ETc con \bar{x} y rango fueron de E1 (2.27 mm d⁻¹, 0 a 5.2 mm d⁻¹), y E2 (1.73 mm d⁻¹, 0 a 4.02 mm d⁻¹), valores cercanos a los obtenidos en la misma zona de estudio y condición climática, con lisímetro (3,78 mm día⁻¹, 1.75 a 5.16 mm d⁻¹) de Neira et al (2020), y con Metric de Quille et al (2020) de (4.98 mm d⁻¹, 0,1 a 7 .84 mm d⁻¹).

En general, la ETC en arrozales, bajo riego inundado, diferentes condiciones climáticas y áreas en estudio, se resumen a continuación: Lee & Kim (2016) con imágenes MODIS y modelo SEBAL, en Korea del Sur, obtienen un valor de 5.30 mm d⁻¹; Sawadogo et al, (2020) con imágenes de LANDSAT 7 y modelo SEBAL en África obtienen valores de (5,12 a 6,17 mm d⁻¹); Taherparvar & Pirmoradian (2018) con imágenes LANSAT 7, en Irán obtienen valores de (3,40 a 8,4017mm d⁻¹); : Djaman et al, (2019) con balance hidrico, en Senegal (África), obtienen valores de (4,40 a 10,5017mm d⁻¹) y Anupoju & Kambhammettu (2020), con balance hidrico, en la India, obtienen valores de (2,43 a 3,05mm d⁻¹).

Tabla 4: Valores (\bar{x}) de NDVI, IAF ALBEDO, RN, G, H, LE, ETc según variedad y experimento

Experimento	VARIEDAD	NDVI	IAF	ALBEDO	Rn (W m ⁻²)	G (W m ⁻²)		H (W m ⁻²)		LE (W m ⁻²)		ETc (mm d ⁻¹)	
						METRIC	SEBAL	METRIC	SEBAL	METRIC	SEBAL	METRIC	SEBAL
E1	V1	0.72	1.69	0.20	671.83	87.61	85.42	339.81	307.73	244.44	277.22	2.38	5.95
	V2	0.73	1.73	0.21	657.03	84.73	84.46	341.78	309.13	230.51	262.39	2.24	5.63
	V3	0.75	1.88	0.22	646.18	78.84	81.08	340.89	308.53	226.42	254.85	2.18	5.36
	PROMEDIO	0.73	1.77	0.21	658.35	83.73	83.65	340.83	308.46	233.79	264.82	2.27	5.65
E2	V1	0.67	1.27	0.22	626.93	92.43	96.50	360.69	327.82	176.09	209.56	1.72	4.44
	V2	0.71	1.58	0.24	614.24	82.07	89.56	358.65	326.00	175.17	204.78	1.71	4.48
	V3	0.72	1.64	0.23	616.37	81.00	88.50	359.04	326.55	177.94	207.65	1.74	4.45
	PROMEDIO	0.70	1.50	0.23	619.18	85.17	91.52	359.46	326.79	176.40	207.33	1.73	4.46

En la Figura 34 se observa en el panel superior la variación temporal del ETC en forma de gráficos de caja para cada experimento desde los 49 DDS hasta los 70 DDS correspondientes a la etapa de macollamiento y en el panel inferior la variación temporal de la humedad del suelo para experimento saturado (E1) y experimento no saturado (E2) así como la humedad a capacidad de campo, observando que la ETC sigue la tendencia de la humedad a capacidad de campo. En la Figura 43 (Anexo 3), se observa la ETC según experimento y variedad de arroz IR43, IR71706 y Sahood Ulan 12.

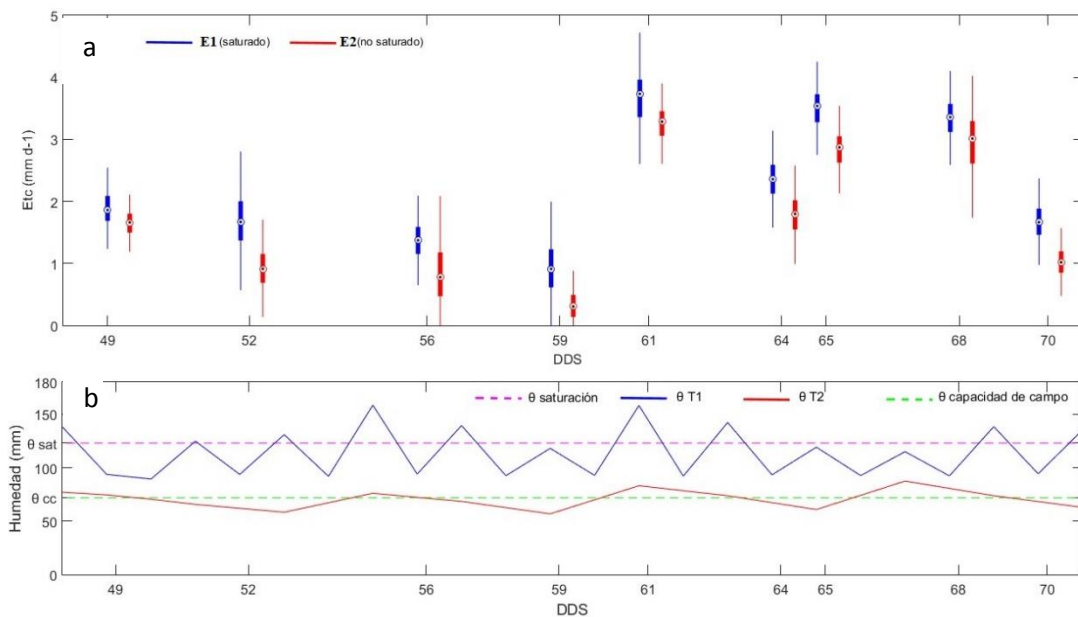


Figura 34: Evapotranspiración del cultivo (ETc) del cultivo de arroz. (a) y humedad del suelo de todo el desarrollo del cultivo (b)

En la Figura 35 se muestra el cálculo de la ETo por los métodos Jensen-Haise, Hargreaves-Samani, Penman-Monteih, Prestley y Taylor y Turc de toda la campaña de arroz.

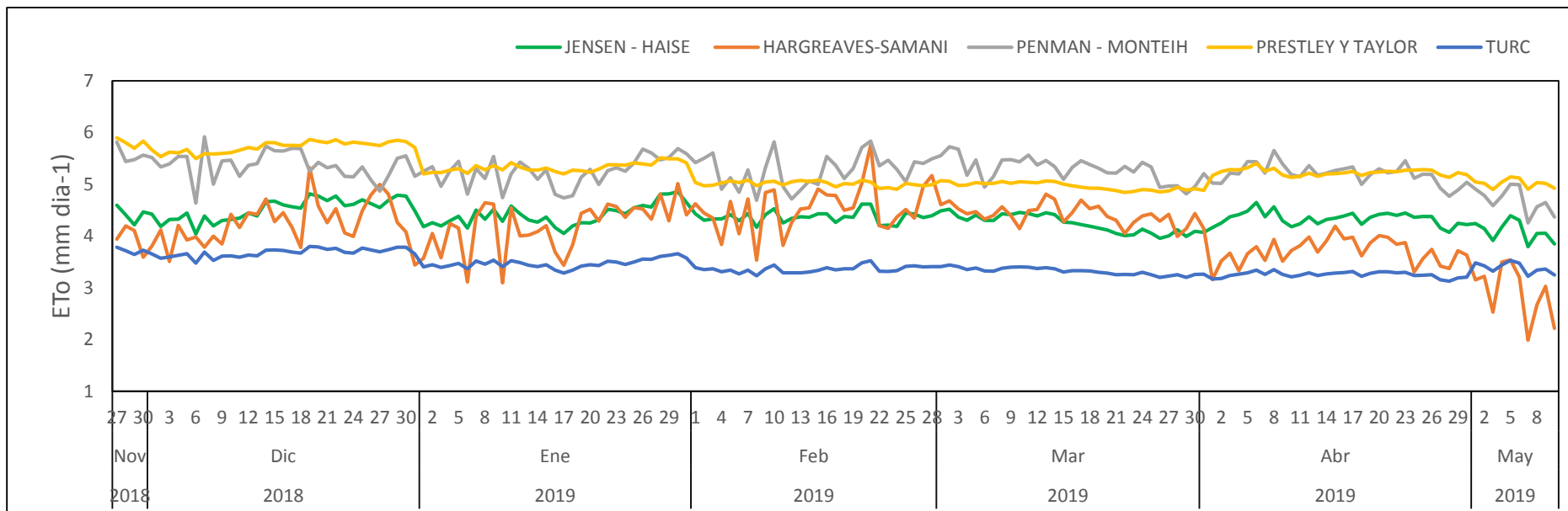


Figura 35: Evapotranspiración de referencia (ETo) estimada a partir de métodos indirectos (Jensen-Haise, Hargreaves-Samani, Penman-Monteih, Prestley y Taylor y Turc), de agosto 2018 a mayo 2019, en La Molina (Lima)

La relación ET_c/ET_o conocido como ET_{rel} , presentan valores ($\bar{x} \pm S$) que varían de 0.51 ± 0.22 en E1; 0.38 ± 0.23 en E2; observando una reducción de 28 % para IR43, 24% para IR71706 y 20% para Sahood Ulan 12.

El cálculo de la ET_{rel} a partir de la relación del ET_c del modelo METRIC y los ET_o de los métodos indirectos se aprecian en la Figura 36c. Al respecto, Taherparvar & Pirmoradian (2018), Neira et al (2020) y Sawadogo et al, (2020), obtuvieron en la etapa inicial de arrozales, valores de 1,05, 0,9 y 0,75 respectivamente, valores mayores a los obtenidos en el estudio, posiblemente influenciados por el sistema de riego, clima, y metodología empleada, ver Figura 36 y Tabla 5.

En la Tabla 5 se presenta resultados de la ET_c y ET_{rel} de otros investigadores en el cultivo de arroz, por clasificación climática, sistema de riego, metodología de estimación, tipo de sensor y país.

En la Tabla 9 (ANEXO 5) se presenta el rendimiento, consumo de agua y eficiencia de uso de agua, por experimentos y variedades. El volumen de agua aplicada en los experimentos fue de $28578 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ y $27723 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ para E1 y E2 respectivamente, influenciado por la presencia de material de relleno a profundidad \geq de 60 cm que favorecía la percolación, en una mayor área en E2.

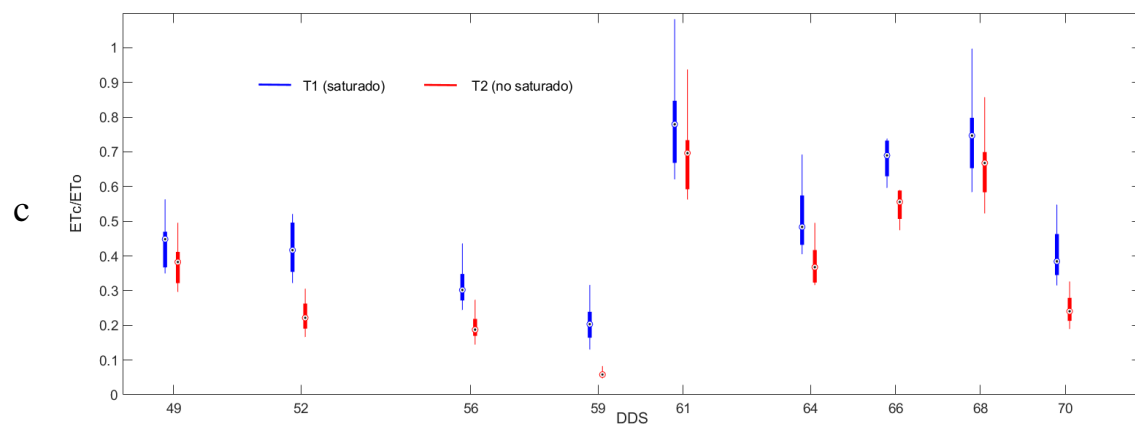
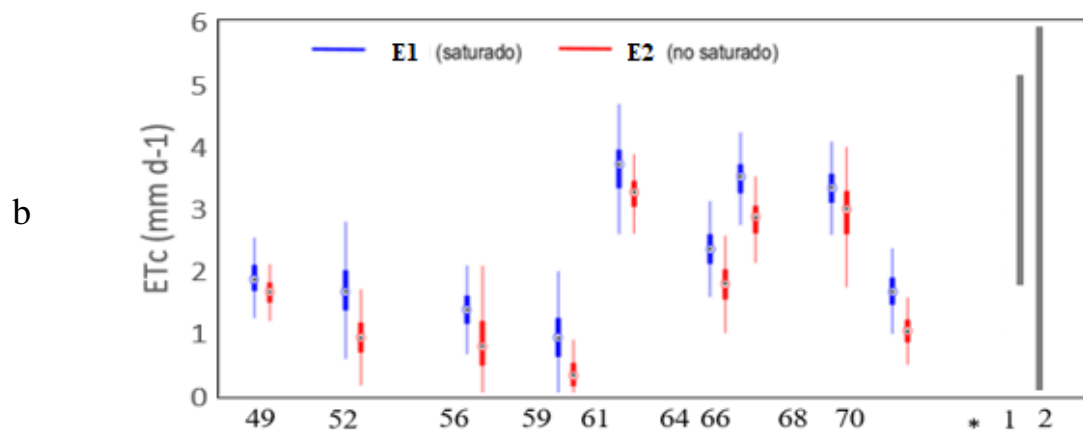


Figura 36: ET₀ estimada por métodos indirectos (a), ET_c estimada con el modelo METRIC y diversos autores (b) y relación entre ET_c del modelo METRIC y ET₀ de métodos indirectos (c) en la molina (Lima). * ubicación según el autor de la Tabla 6.

Tabla 5: Valores de ETc en el cultivo de arroz según diversos investigadores

Clasificación climática Köppen-Geiger	Sistema de riego	Metodo para estimar Etc	Sensor remoto	ETc (mm d ⁻¹)	ETrel=ETc/ETo	Referencia / Pais	*
Arido calido T.: 18.5°C, pp: 90mm	Goteo	balance hídrico (lisímetro)		1.75-5.16	0,9; 1,70 y 0,84 inicio medio y final	Neira et al(2020) / Perú	1
Arido calido T.: 18.5°C, pp :90 mm	Goteo	balance de energía (METRIC)	RPA	1.65-7.48		Quille et al(2020) / Perú	2
Arido T.: 25.09°C, pp: 206mm	riego inundado	ETo x Kc	landsat 7	3.40-8.40	1.05, 1.20 y 0.60 inicio medio y final	Taherparvar & Pirmoradian (2018) / Iran	3
Tropical T.: 29.8°C, pp.: 263mm	riego inundado	balance hídrico		4.40-10.50	1,01, 1,31 y 1,12- inicio medio y final	Djaman et al, (2019) / Senegal	4
Humedo tropical T.: 27° C, pp.:1000mm	riego inundado	balance de energía (SEBAL)	landsat 7	5.52-6.17	0.6-0.91 y 0.8-0.95	Sawadogo et al, (2020) / Burkina Faso	5
Sabana tropical T: 27.5°C , pp.: 1100mm	riego inundado	balance hídrico (SIMDualKc)		2.43-3.05	1,1, 1,09, 0,79 - inicio medio y final	Anupoju & Kambhammettu (2020) / India	6
Monzónico subtropical T.: 15.5 °C, pp.: 1097.1 mm	riego inundado	balance de energía	Torre de flujo	4.03 (torre de flujo)		Liu et al., (2018) / China	7
Templado T.: 11.5°C, pp: 1107mm	Inundado	balance de energía (SEBAL) Eddy Covariance	MODIS Torre de flujo	5.30 (SEBAL) 5,20 (Torre de flujo)		Lee & Kim. (2016) / Korea del sur	8

V. CONCLUSIONES

1. La evapotranspiración del cultivo (ETc) de arroz por balance de energía, con el modelo SEBAL, obtuvo valores ($\bar{x} \pm S$) de ($5,05 \text{ mmd}^{-1} \pm 1.37$) y con el modelo METRIC, valores ($\bar{x} \pm S$) de ($2.00 \text{ mmd}^{-1} \pm 1.05$), durante la fase de macollamiento; observando que SEBAL resulto ser mayor en 3.06 mm d^{-1} respecto a METRIC.
2. En la caracterización del NDVI y IAF se obtuvieron valores ($\bar{x} \pm S$) de (0.51 ± 0.21) y ($0,86 \pm 0,88$), respectivamente. Además, el ajuste de NDVI e IAF con información de campo obtuvo un R de Pearson de 0,58 a 0,88 para NDVI y de 0,73 a 0,85 para IAF, significativo para la prueba T-Student para un alfa del 5%.
3. Los componentes del balance de energía en el arroz obtuvo valores (\bar{x}) de Rn ,G, H y LE de (638,76; 87,59; 317,63, 236,08) en SEBAL, y (638,76; 84.45; 350.14, 205,10) en METRIC; obteniéndose que la Rn y LE, aumenta un (6% y 28%) SEBAL y (6% y 33%) METRIC en E1; además G y H se incrementan en E2 en (9 % y 6%) SEBAL, y (2% y 6%) METRIC, por el menor contenido de agua en el suelo.
4. El diseño de bloques completamente al azar con estructura factorial con dos experimentos, mostro que hay diferencia significativa entre experimentos, obteniéndose valores (\bar{x} y rango) de ETc en E1 de 5.65 (0 - 10,11) mm d^{-1} y en E2 de 4.46 (0 a 8,39) mm d^{-1} para SEBAL y en E1 de 2,27 (0 a 5,2) mm d^{-1} y E2 de 1,73 (0 a 4,02) mm d^{-1} para METRIC, no habiendo diferencia significativa entre tratamientos del mismo experimento, observando que el E1 muestra mayor evapotranspiración.

VI. RECOMENDACIONES

1. Realizar medición directa extractivas con muestreo de hojas por variedades para el cálculo del IAF y mediciones en campo de la reflectividad con un reflectómetro para calibración del equipo Green Seaker.
2. Validar los resultados de la ETc al aplicar las metodologías en áreas más extensas como los campos agrícolas.
3. Realizar los vuelos con el menor tiempo posible para evitar que el calor de la propia cámara térmica influya sobre los datos captados por la misma debido a que no son cámaras refrigeradas.
4. Realizar un proceso de automatización a los modelos SEBAL y METRIC con software de programación para acelerar los resultados.
5. Para ajustar el método es conveniente instalar lisímetros o torres de flujo en la misma zona de estudio.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R. G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J. L., Bastiaanssen, W., Kramber, W., Lorite, I., & Robison, C. W. (2007). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 395-406. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2007\)133:4\(395\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2007)133:4(395))
- Allen, R., Irmak, A., Trezza, R., Hendrickx, J. M. H., Bastiaanssen, W., & Kjaersgaard, J. (2011). Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC: SATELLITE-BASED ET ESTIMATION WITH SEBAL AND METRIC. *Hydrological Processes*, 25(26), 4011-4027. <https://doi.org/10.1002/hyp.8408>
- 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. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00202-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00202-4)
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212-213, 198-212. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4)
- Bhattarai, N., Quackenbush, L. J., Im, J., & Shaw, S. B. (2017). A new optimized algorithm for automating endmember pixel selection in the SEBAL and METRIC models. *Remote Sensing of Environment*, 196, 178-192. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.009>
- Castañeda, C. R., Flores Magdaleno, H., Martínez Menes, M., & Esparza Govea, S. (2018). Estimación de la evapotranspiración mediante un balance de energía utilizando sensores remotos. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(15), 537. <https://doi.org/10.19136/era.a5n15.1647>
- Folhes, M. T., Rennó, C. D., & Soares, J. V. (2009). Remote sensing for irrigation water management in the semi-arid Northeast of Brazil. *Agricultural Water Management*, 96(10), 1398-1408. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.021>

- 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. <https://doi.org/10.3390/rs8120983>
- Liu, X., Xu, J., Yang, S., & Zhang, J. (2018). Rice evapotranspiration at the field and canopy scales under water-saving irrigation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 130(2), 227-240. <https://doi.org/10.1007/s00703-017-0507-z>
- Mendoza-Pérez, C., Ramírez-Ayala, C., Ojeda-Bustamante, W., Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Flores-Magdaleno, H., & Colegio de Postgraduados. (2017). Estimation of leaf area index and yield of greenhouse-grown poblano pepper. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 9(1), 37-50. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2017.04.009>
- MINAGRI. (2017). Ministerio de Agricultura y Riego: Arroz. *Dirección General de Seguimiento y Evaluación de Políticas.*, 1-9.
- Nhamo, L., Magidi, J., Nyamugama, A., Clulow, A. D., Sibanda, M., Chimonyo, V. G. P., & Mabhaudhi, T. (2020). Prospects of Improving Agricultural and Water Productivity through Unmanned Aerial Vehicles. *Agriculture*, 10(7), 256. <https://doi.org/10.3390/agriculture10070256>
- Niu, H., Hollenbeck, D., Zhao, T., Wang, D., & Chen, Y. (2020). Evapotranspiration Estimation with Small UAVs in Precision Agriculture. *Sensors*, 20(22), 6427. <https://doi.org/10.3390/s20226427>
- Niu, H., Zhao, T., Wang, D., & Chen, Y. (2019a). &Estimating Evapotranspiration with UAVs in Agriculture: A Review<i>2019 Boston, Massachusetts July 7- July 10, 2019. 2019 Boston, Massachusetts July 7- July 10, 2019. <https://doi.org/10.13031/aim.201901226>
- FAO. 20191. Crops. www.fao.org/faostat/en/#data/QC (Fecha de acceso: 3 de junio del 2021).
- Quille Mamani, J., Ramos Fernández, L., & Ontiveros Capurata, 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.2021.13699>
- 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>

- Schirmbeck, J., Fontana, D. C., Roberti, D. R., & Schirmbeck, L. W. (2017). Energy balance from images in humid climate – SEBAL and METRIC. *Agrometeoros, Passo Fundo*, 25(2), 11.
- Taherparvar, M., & Pirmoradian, N. (2018). Estimation of Rice Evapotranspiration Using Reflective Images of Landsat Satellite in Sefidrood Irrigation and Drainage Network. *Rice Science*, 25(2), 111-116. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2018.02.003>
- Tasumi, M. (2003). *Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery* [Ph.D. dissertation, Univ. of Idaho].
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2003PhDT.....15T>
- Tsouni, A., Charalabos, K., Koutsoyiannis, D., Elias, P., & Mamassis, N. (2008). Estimation of Actual Evapotranspiration by Remote Sensing: Application in Thessaly Plain, Greece. *Sensors*, 8. <https://doi.org/10.3390/s8063586>
- Zamani Losgedaragh, S., & Rahimzadegan, M. (2018). Evaluation of SEBS, SEBAL, and METRIC models in estimation of the evaporation from the freshwater lakes (Case study: Amirkabir dam, Iran). *Journal of Hydrology*, 561, 523-531.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.025>

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: PANEL FOTOGRÁFICO



Figura 37: Preparación del terreno y monitoreo del cultivo



Figura 38: Toma de datos de la RPA para fotografías multiespectrales, toma de datos del Green Seaker para NDVI (imagen inferior izquierda) y del Ceptometro Accupar para IAF (imagen inferior derecha)



Figura 39: Cámara multiespectral Parrot Sequoia, diana de calibración de al reflectancia y Cámara térmica FLIR.

ANEXO 2: ANÁLISIS DE AGUA Y SUELO



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
 FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
 LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



ANÁLISIS DE SUELOS : SALINIDAD

Procedencia
Departamento : LIMA **Provincia:** LIMA
Distrito : LA MOLINA **Predio :**
Referencia : H.R. 66422-182S-18 **Solicitante:** PROYECTO N° 008-2016 INIA-PNIA-UPMSI-IE
Factura : 2346

Lab.	Número de Muestra	C.E.	Análisis Mecánico				pH	CaCO ₃	M.O.	P	K	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases	
			dS/m	Arena	Limo	Arcilla						Textura	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺				Al ³⁺ + H ⁺
			1:1	%	%	%							meq/100g	meq/100g	meq/100g	meq/100g				meq/100g
16701	Inundado	0.76	48	26	26	Fr.Ar.A.	7.36	0.9	1.94	51.3	332	13.44	11.23	1.52	0.47	0.23	0.00	13.44	13.44	100
16702	Secas	0.86	46	26	28	Fr.Ar.A.	7.53	0.8	1.72	39.8	287	13.12	10.42	1.87	0.63	0.21	0.00	13.12	13.12	100

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

No Muest. Lab	Saturación %	pH	C.E. Ext. St. dS/m	Cationes Solubles (meq/L)					Aniones Solubles (meq/L)					Boro Soluble ppm	Yeso Soluble %	PSI	
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SUMA	NO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻				SUMA
16701	35	7.26	1.83	9.90	3.33	0.79	5.39	19.41	0.12	0.00	3.36	9.13	6.90	19.51	0.68	0.00	1.68
16702	35	7.34	1.52	8.55	2.25	0.63	4.70	16.13	0.09	0.00	3.48	7.71	4.80	16.08	0.57	0.00	1.59

No Muest. Lab	Nitrogeno amoniacal ppm	Nitrogeno nitrico ppm	Nitrogeno total %	D.A. g/cc	P.M %	C.C %	C %	Porosidad %
16702	33.60	0.38	0.09	1.42	11.94	21.63	1.00	45.72

La Molina, 21 de Diciembre del 2018

Av. La Molina s/n Campus UNALM - Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622 e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

Figura 40: Análisis de suelo



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DRH
LABORATORIO DE AGUA, SUELO, MEDIO AMBIENTE Y FERTIRRIEGO

Av. La Molina s/n. Telefax: 6147800 Anexo 226 Lima. E-mail: las-fia@lamolina.edu.pe

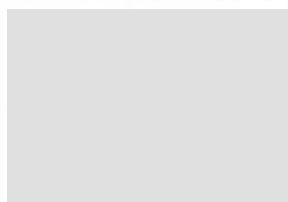


Nº 008372

ANÁLISIS DE AGUA - RUTINA

SOLICITANTE : DRA. LIA RAMOS FERNANDEZ
PROCEDENCIA : Lima - ADYAER (Area Demostrativa y Area Experimental de Riego)
RESPONSABLE ANALISIS : Ing. Nore Arévalo Flores
FECHA DE ANALISIS : La Molina, 27 de Noviembre de 2017

Nº LABORATORIO	8372
Nº DE CAMPO	M-1
CE dS/m	0.63
pH	7.40
Calcio meq/l	4.60
Magnesio meq/l	0.65
Sodio meq/l	0.91
Potasio meq/l	0.10
SUMA DE CATIONES	6.25
Cloruro meq/l	0.98
Sulfato meq/l	2.70
Bicarbonato meq/l	2.80
Nitratos meq/l	0.00
Carbonatos meq/l	0.00
SUMA DE ANIONES	6.49
SAR	0.56
CLASIFICACION	C2-S1
Boro ppm	0.02
Dureza total mgCaCO₃/L	156.81
Alcalinidad total mgCaCO₃/L	140.19
Sólidos suspendidos mg/L	6.00
Turbidez mg/L	10.20



JEFE DE LABORATORIO

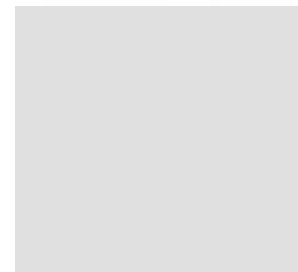


Figura 41: Análisis del agua de riego proveniente del reservorio del Área Experimental de Riego (AER)



ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE AGUA

SOLICITANTE : LIA RAMOS
PROCEDENCIA : Reservorio UNALM
RESPONSABLE ANÁLISIS : Ing. Nore Arévalo Flores
FECHA DE ANÁLISIS : La Molina, 28 de diciembre de 2017

Nº LABORATORIO	3844
Nº DE CAMPO	Agua
Nitrogeno mgN-NH ₃ /L	106.79
Nitrogeno mgN - organico/L	69.19
Nitrogeno mgN total/L	270.12
Fosforo mg P total/L	84.38
Fosforo mg P soluble/L	5.33
Nitratos mg/L	0.10

Figura 42: Análisis del agua de riego proveniente del reservorio de la Unidad de Riego de la UNALM.

ANEXO 3: ETC del ARROZ Y HUMEDAD DEL SUELO

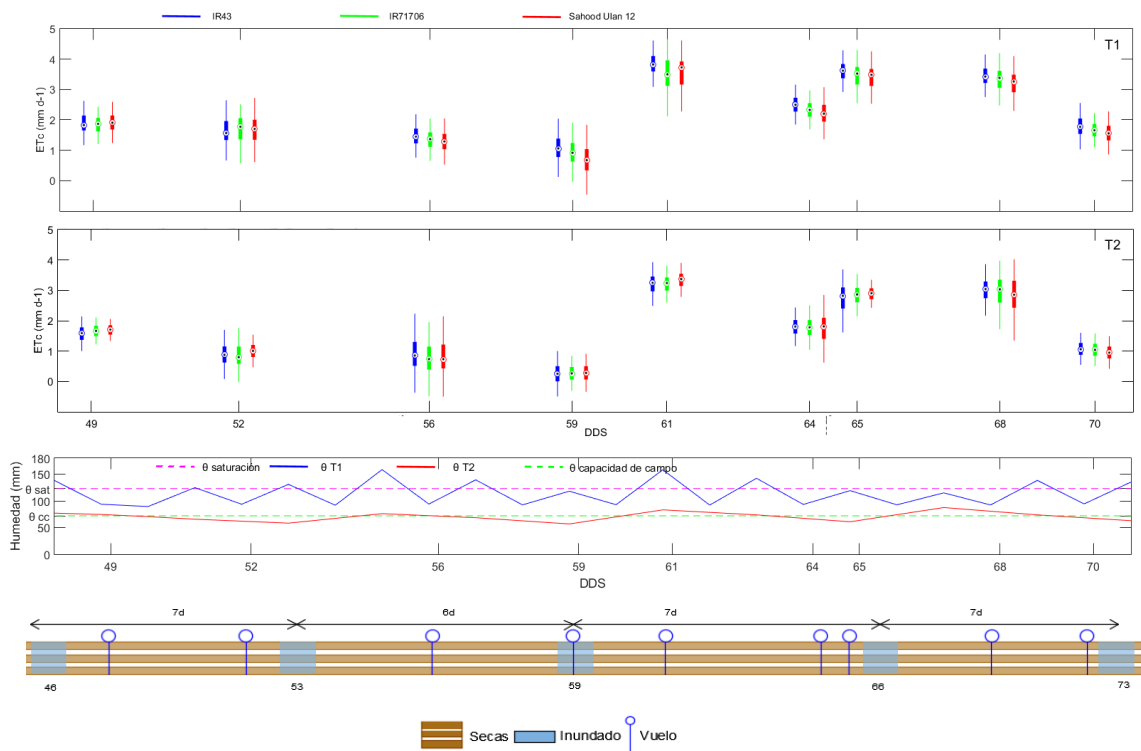


Figura 43: Evapotranspiración del cultivo (ETc) en en tres variedades de arroz IR43, IR71706 y Sahood Ulan 12 en E1 (panel superior) y E2 (panel central) y la variación de humedad del suelo (panel inferior)

ANEXO 4: ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Tabla 6: Análisis de varianza (ANOVA) según el ETc por tratamiento en E1

<i>F.V</i>	<i>SC</i>	<i>gl</i>	<i>CM</i>	<i>F</i>	<i>P valor</i>	<i>sig < 0.05</i>
Tratamientos	0.08201667	2	0.04100833	1.29250569	0.32103856	NS
Entre grupos	0.28555	9	0.03172778			
Total	0.36756667	11	0.03341515			

(*) significativo

(NS) no significativo

Tabla 7: Análisis de varianza (ANOVA) según el ETc por tratamiento en E2.

<i>F.V</i>	<i>Sc</i>	<i>gl</i>	<i>CM</i>	<i>F</i>	<i>P valor</i>	<i>sig < 0.05</i>
Tratamientos	0.00111667	2	0.00055833	0.0687885	0.93401009	NS
Entre grupos	0.07305	9	0.00811667			
Total	0.07416667	11	0.00674242			

(*) significativo

(NS) no significativo

Tabla 8: Análisis de varianza y Prueba de duncan (p=0.05) según el ETc del análisis combinado de los experimentos.

<i>F.V.</i>	<i>SC</i>	<i>gl</i>	<i>CM</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>
Modelo	1.701	5	0.340	13.128	1.77E-05
Experimento	1.643	1	1.643	120.528	0.0082
Tratamiento	0.010	2	0.005	0.349	0.7413
Experimento*Tratamiento	0.027	2	0.014	0.526	0.5997
Error	0.466	18	0.026		
Total	2.167	23			

Experimento	Medias	n	E.E.	Agrupación
E1	2.27	11	0.036	A
E2	1.74	13	0.033	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Experimento	Tratamiento	Medias	n	E.E.	Agrupación
E1	T1	2.33	4	0.080	A
E1	T2	2.24	4	0.080	A
E1	T3	2.24	3	0.093	A
E2	T3	1.79	5	0.072	B
E2	T1	1.72	4	0.080	B
E2	T2	1.71	4	0.080	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

ANEXO 5: AGUA APLICADA Y RENDIMIENTO DEL CULTIVO

Tabla 9: Agua aplicada, rendimiento y eficiencia de uso de agua por experimento y tratamientos

Detalle	Agua aplicada (m ³ ha ⁻¹)	Rendimiento (Kg ha ⁻¹)	EUA aplicada(Kg m ⁻³)
E1	28578	10390	0.36
E2	27723	9711	0.35
+IR43	35317	11063	0.31
+IR71706	26783	12345	0.35
+Sahood Ulan 12	23634	7762	0.22
*IR43	28163	10887	0.39
*IR71706	28674	11571	0.41
*Sahood Ulan 12	26331	6674	0.24
+(E1), *(E2)			