

“UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO”

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

ESCUALA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



TESIS

**“Estimación del estrés hídrico del cultivo de arroz a
partir de imágenes térmicas de un VANT en
Ferreñafe, Lambayeque”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÍCOLA**

INVESTIGADOR:

Bach. Heler Samir Pérez Cubas

Asesor:

Dr. Juan Manuel Saavedra Tineo

LAMBAYEQUE - PERÚ

2020



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
ESCUALA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“Estimación del estrés hídrico del cultivo de arroz
a partir de imágenes térmicas de un VANT en Ferreñafe,
Lambayeque”**

TESIS

Presentada a la Facultad de Ingeniería Agrícola por:

Bach. Heler Samir Pérez Cubas

Como requisito indispensable para obtener el título de:


INGENIERO AGRÍCOLA



Dr. SEGUNDO AVELINO SÁNCHEZ CUSMA
Presidente



Dr. WILFREDO DÍAZ CÓRDOVA
Secretario



M.S.c. JUAN VICENTE HERNÁNDEZ ALCÁNTARA
Vocal



Dr. JUAN MANUEL SAAVEDRA TINEO
Patrocinador

Lambayeque, 2020

Dedicatoria

A mis padres, Gabriel Pérez Guevara y Sabina Cubas Díaz, por su amor incondicional, el esfuerzo de educarme en la vida y hacerme profesional.

Agradecimiento

A Dios por permitirme ser quien soy.

A mis hermanos por su apoyo y cariño.

A mi querida alma mater, la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo y la Facultad de Ingeniería Agrícola con sus ingenieros, docentes que me formaron en esta hermosa profesión.

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.

A mi asesor, el Dr. Juan Manuel Saavedra Tineo, por su apoyo y orientación profesional.

A mi coasesora Dra. Lía Ramos Fernández, por la orientación y asesoría en esta investigación, y al grupo de investigación DANI “Teledetección y cambio climático aplicado a los recursos hídricos y la agricultura” por el apoyo logístico y tecnológico.

A mis amistades.

RESUMEN

El arroz, al ser uno de los principales alimentos del mundo y el que más agua demanda, está impulsando a la investigación de nuevas tecnologías que faciliten la producción máxima con el uso mínimo del recurso hídrico, de manera sostenible. Ante este nuevo paradigma, se desarrolló el presente estudio con la finalidad de determinar el índice de estrés hídrico foliar (CWSI) a partir de imágenes térmicas, captadas por una cámara térmica instalada en un vehículo aéreo no tripulado (VANT), para luego correlacionarlo con la humedad volumétrica del suelo, bajo un sistema de riego por goteo en el fundo Zapote Figueroa, en Ferreñafe, durante la campaña agrícola enero - junio de 2019. El CWSI se determinó a partir de la temperatura foliar y de las temperaturas umbrales húmeda y seca [$CWSI = (T^{\circ} \text{foliar} - T^{\circ} \text{húmeda}) / (T^{\circ} \text{seca} - T^{\circ} \text{húmeda})$]. Para la obtención de la temperatura foliar, primero se extrajo la cobertura vegetal de la imagen térmica general de la parcela mediante la superposición de imágenes RGB y térmica. Las temperaturas umbrales húmeda y seca se obtuvieron a las 8:00 horas y a las 13:00 horas respectivamente, con valores de 20°C a 22°C y de 27.2°C a 31.5°C en las fases vegetativa y reproductiva. Por otra parte, se monitoreó la humedad volumétrica del suelo con el TDR de manera puntual, en el centro de gravedad de cada bloque, a una profundidad de 20 cm. Finalmente, se obtuvo un coeficiente de correlación lineal de Pearson entre el CWSI y la humedad volumétrica del suelo de -0.263, cuya ecuación representativa de todo el estudio es $y = -4.7568x + 32.497$, donde “y” es la humedad volumétrica (variable dependiente) y “x” es el CWSI (variable independiente). Se concluye que la estimación del CWSI para determinar la humedad volumétrica del suelo mediante la temperatura foliar de imágenes térmicas recolectadas por un VANT es posible y viable, pudiendo establecer relación entre las dos variables mencionadas.

Palabras clave: índice de estrés hídrico foliar, humedad volumétrica del suelo, temperatura foliar, imagen térmica, cultivo de arroz.

ABSTRACT

Rice, being one of the world's leading foods, which requires a lot of water, is driving the research of new technologies that facilitate maximum production with minimal use of water resources, in a sustainable way. Faced with this new paradigm, this study was developed with the aim of determining the foliar water stress index (CWSI) from thermal imaging, captured by a thermal camera installed in an unmanned aerial vehicle (UAV), and then correlate it with the volumetric moisture of the soil, under drip irrigation at the "Zapote Figueroa" farm, in Ferreñafe, from January to June 2019. CWSI was determined from foliar temperature and wet and dry threshold temperatures $[CWSI = (T_{foliar} - T_{wet}) / (T_{dry} - T_{wet})]$. To obtain the foliar temperature, it began with the extraction of the vegetation cover of the general thermal image of the plot by superimposing RGV and thermal images. Wet and dry threshold temperatures were obtained at 8:00 and 13:00 respectively, with values from 20 °C until 22 °C and 27.2 °C until 31.5 °C in the vegetative and reproductive phases. On the other hand, the volumetric moisture of the soil was monitored with the TDR in a specific manner, at the center of gravity of each block, at a depth of 20 cm. And finally, with that it is possible to obtain a Pearson's linear correlation coefficient between the CWSI and the volumetric soil moisture of -0.263, whose representative equation of the entire study is $y = -4.7568x + 32.497$, where "y" is the volumetric humidity (dependent variable) and "x" is the CWSI (independent variable). It is concluded that the estimation of CWSI to determine the volumetric moisture of the soil using the foliar temperature of thermal images collected by an UAV is possible and feasible, being able to establish a relationship between the two mentioned variables.

Key words: foliar water stress index; volumetric moisture of the soil; foliar temperature; thermal image, rice crop.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN..... | 3 |
| 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 3 |
| 1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... | 4 |
| 1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN..... | 5 |
| 1.3.1. Objetivo general | 5 |
| 1.3.2. Objetivos específicos..... | 5 |
| 1.4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO..... | 5 |
| 1.5. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN | 6 |
| CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO..... | 7 |
| 2.1 ANTECEDENTES DEL ESTUDIO | 7 |
| 2.2 BASES TEÓRICAS | 8 |
| 2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS | 10 |
| 2.3.1. Cultivo de arroz | 10 |
| 2.3.2. Estrés abiótico..... | 11 |
| 2.3.3. Estrés hídrico..... | 11 |
| 2.3.4. Estrés Hídrico Foliar | 12 |
| 2.3.5. Estrés Térmico | 12 |
| 2.3.6. Índice de estrés hídrico foliar | 12 |
| 2.3.7. Termografía..... | 13 |
| 2.3.8. Sensores térmicos..... | 13 |
| 2.3.9. Procesamiento de imágenes térmicas | 14 |
| 2.3.10. Humedad del suelo..... | 14 |
| 2.3.11. Programación de riego | 15 |
| 2.4. HIPÓTESIS | 15 |
| 2.4.1. Hipótesis general..... | 15 |
| 2.4.2. Hipótesis específicas | 15 |
| 2.5. VARIABLES..... | 16 |
| 2.5.1. Definición conceptual de la variable..... | 16 |
| 2.5.2. Definición operacional de la variable | 16 |
| 2.5.3. Operacionalización de la variable | 17 |
| CAPÍTULO III: METODOLOGÍA | 18 |
| 3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN..... | 18 |
| 3.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁMBITO DE LA INVESTIGACIÓN..... | 18 |

| | |
|---|----|
| 3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA | 19 |
| 3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS | 20 |
| 3.5. VALIDEZ Y CONFIABILIDAD DEL INSTRUMENTO | 20 |
| 3.6. PLAN DE RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS | 22 |
| CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 31 |
| 4.1. UMBRALES DE TEMPERATURA | 31 |
| 4.2. CWSI A PARTIR DE LA TEMPERATURA FOLIAR | 34 |
| 4.3. RELACIÓN DEL CWSI Y LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA DEL SUELO | 38 |
| CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 47 |
| 5.1. CONCLUSIONES..... | 47 |
| 5.2. RECOMENDACIONES..... | 48 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 49 |
| ANEXOS..... | 52 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Parcela experimental. Tratamiento por goteo (norte) e inundación (sur). | 18 |
| Figura 2. Distribución de tratamientos y sus respectivos bloques. | 19 |
| Figura 3. Duración y grados días de calor según fase fenológica del cultivo de arroz en Ferreñafe, Lambayeque. | 24 |
| Figura 4. Relación entre humedad volumétrica real y aparente, en la que también se muestra los valores de CC y PMP. | 27 |
| Figura 5. Esquema del procedimiento desarrollado en gabinete en esta investigación. | 30 |
| Figura 6. Comportamiento promedio horario de la temperatura del aire (a) en el estado vegetativo de macollamiento (panel superior) y (b) en el estado vegetativo de floración y formación de grano lechoso (panel inferior). | 33 |
| Figura 7. Mapa del CWSI del cultivo de arroz, para los días 20,21 y 22 de marzo respectivamente, de la parcela regada por goteo. | 35 |
| Figura 8. Mapa del CWSI del cultivo de arroz, para los días 06 y 07 de mayo respectivamente, de la parcela regada por goteo. | 36 |
| Figura 9. Mapa del CWSI del cultivo de arroz, para los días 08 y 09 de mayo respectivamente, de la parcela regada por goteo. | 37 |
| Figura 10. Correlación lineal entre el CWSI y la humedad volumétrica del suelo para los bloques en tratamiento por goteo en la primera fase de colecta de datos. | 39 |
| Figura 11. Correlación lineal entre el CWSI y la humedad volumétrica del suelo para los bloques en tratamiento por goteo en la segunda fase de colecta de datos. | 39 |
| Figura 12. Correlación lineal entre el CWSI y la humedad volumétrica del suelo para el cultivo de arroz en Ferreñafe, Lambayeque. | 40 |
| Figura 13. Esquema del procedimiento a seguir en el ArcGis, para obtener un mapa de humedad del suelo y que responda a las preguntas ¿Cuánto y cuando regar? | 42 |

Figura 14. Mapas de humedad del suelo para los días 20. 21 y 22 de marzo, en la fase fenológica vegetativa. 43

Figura 15. Mapas de humedad del suelo para los días 06 y 07 de mayo, en la fase reproductiva y maduración. 44

Figura 16. Mapas de humedad del suelo para los días 08 y 09 de mayo, en la fase reproductiva y maduración. 45

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Operacionalización de las variables. | 17 |
| Tabla 2. Equipos, insumos y herramientas computacionales, utilizados en el desarrollo de la investigación. | 20 |
| Tabla 3. Cronograma de recolección de datos según las fases fenológicas del cultivo. | 23 |
| Tabla 4. Horas representativas para estimar las temperaturas húmeda y seca del aire. | 31 |
| Tabla 5. Temperaturas húmeda y seca, según la fase fenológica, de cada día de toma de datos en campo. | 32 |
| Tabla 6. Agua utilizada en la parcela experimental para producir el cultivo de arroz en los dos bloques, por goteo e inundación. | 46 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|--|----|
| Anexo 1. Materiales y equipos | 52 |
| Anexo 2. Evolución del cultivo | 54 |
| Anexo 3. Levantamiento de información en campo o lectura de datos | 56 |
| Anexo 4. Procesamiento de imágenes térmicas | 58 |
| Anexo 5. Estadístico de prueba “T” para aceptar o rechazar la hipótesis nula de la relación lineal entre el CWSI y la humedad volumétrica del suelo, para todos los datos colectados y graficados en la figura 12..... | 60 |
| Anexo 6. Datos filtrados de CWSI y humedad volumétrica del suelo, recolectados en campo..... | 62 |
| Anexo 7. Plano de la parcela experimental | 63 |

ÍNDICE DE TÉRMINOS

Acrónimo

| | |
|---------|--|
| CCI | Capacidad de campo. |
| CWSI | Crop water stress index (índice de estrés hídrico foliar). |
| FAO | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. |
| GPS | Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global). |
| INIA | Instituto Nacional de Innovación Agraria. |
| NDVI | Normalized difference vegetation index (Índice de vegetación de diferencia normalizada). |
| PMP | Punto de marchitez permanente. |
| RGB | Red, green, blue (rojo, verde y azul). |
| SENAMHI | Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. |
| SWIR | Short Wave Infrared (Bandas infrarrojas de longitud de onda corta). |
| Ta | Temperatura del aire. |
| Tc | Temperatura del cultivo (foliar). |
| TDR | Time domain ref (Reflectometría de Dominio Temporal). |
| TIFF | Tagged image file format (Formato de archivo de imagen etiquetada). |
| UNALM | Universidad Nacional Agraria La Molina. |
| UTM | Universal Transversal de Mercator. |
| VANT | Vehículo aéreo no tripulado. |

INTRODUCCIÓN

Los acontecimientos climáticos vistos en la última década han traído dentro de sus consecuencias principales la escasez de agua en los lugares más remotos y pobres del mundo. Por otra parte, el aumento de la población cada día demanda de más alimentos y consecuentemente de más terrenos a cultivar, aumentando el uso del agua para la agricultura.

El arroz, es uno de los principales alimentos del mundo y el que más agua demanda debido a su sistema tradicional de riego por inundación. En la región Lambayeque, al norte del Perú, la base de la economía es la agricultura, siendo este cultivo el principal protagonista y el alimento base de la población lambayecana; demandando 14,000 metros cúbicos de agua por hectárea para su producción en una sola campaña. La situación es alarmante, y está pasando desapercibida por las autoridades agrícolas, universidades y agricultores en general, puesto que Lambayeque al encontrarse en la franja costera desértica del Perú, tiene escasas precipitaciones anuales que no superan los 50 mm, dependiendo únicamente del agua proveniente de las cuentas altas del río Chancay, Chotano, Conchano, Motupe, Olmos, La Leche y Zaña, siendo de estos el más importante el Chancay, el único que escurre un caudal durante todo el año y el que abastece al Valle Chancay Lambayeque, el principal de la región y en donde se encuentran asentadas las grandes ciudades de Chiclayo, Ferreñafe y Lambayeque.

La salinización de las tierras agrícolas por el uso excesivo de agua para cultivar arroz, es un problema que viene acompañando a lo expresado anteriormente, lo cual conlleva a una desertificación del valle en un futuro. Además de la merma de precipitaciones en las cuencas altas de los ríos mencionados debido al cambio climático, nos enfrentaremos a un problema de gran magnitud en unos veinte años (a mi parecer).

Ante la problemática expuesta, surgen iniciativas para investigar nuevas metodologías alternativas al tradicional riego por inundación, con la finalidad de disminuir el consumo de agua y producir la misma cantidad de grano.

A causa de ello se tomó la decisión de realizar una investigación en el fundo Zapote Figueroa, en Ferreñafe; con la ayuda de profesionales de la Universidad Nacional Agraria La Molina, cuyo objetivo fue determinar el índice de estrés hídrico foliar del cultivo de arroz ((CWSI por sus siglas en inglés “Crop Water Stress Index”) mediante imágenes térmicas capturadas por una cámara térmica instalada en vuelo aéreo no tripulado (VANT) para luego relacionarlo con la humedad volumétrica del suelo, y luego ver la relación que existe entre estas dos variables, dependiendo de su coeficiente de correlación lineal de Pearson.

El propósito final de esta investigación fue estimar la humedad volumétrica del suelo mediante el CWSI a través de una ecuación lineal, es decir, un método alternativo a los tradicionales sensores de humedad de suelo con tensiómetros; un método aplicable para extensiones grandes de área sembrada en el cual se emplea la temperatura foliar obtenida del producto de volar un drone, facilitando así saber cuándo el suelo necesita de riego y en qué cantidades, en un sistema de riego por goteo en el que gracias a la utilización de sensores remotos de humedad y temperatura es posible reducir el consumo de agua en más un 50% de la utilizada en un riego tradicional.

CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La búsqueda de nuevas tecnologías que faciliten el uso sostenible del riego (agua) en la planificación agrícola ha abierto muchas posibilidades de investigación en cómo dotar de manera óptima de agua a los cultivos, entre ellos el arroz, el cual, demanda de grandes cantidades de este recurso para su producción.

En la India, segundo país productor de este cereal a nivel mundial (FAO, 2018), se ha incrementado en los últimos años las investigaciones en riego por goteo en el cultivo de arroz, enfatizando en la siembra directa, en la que se comparan los rendimientos de grano y paja en dicho cultivo, bajo riego por goteo, inundación y aspersión (Thangjam, *et al*, 2017), con la finalidad de reducir el consumo de agua sin reducir el rendimiento.

Para controlar y programar el riego, es necesario conocer el contenido de humedad del suelo, para lo cual se utilizan sensores instalados en campo cuya información es puntual. Para llevar esta información puntual a una información espacial que represente la heterogeneidad del campo, es necesario usar otro tipo de colecta de datos con mayor amplitud de información como son las imágenes térmicas.

Como es sabido que los cultivos solamente consumen lo necesario de agua, se ha experimentado en Lambayeque, sembrar arroz de manera directa y en seco, para después regarlo por goteo. Es por ello que en esta investigación experimental, cuya población es un área sembrada de arroz de 1,680 m²; se estimó un índice de estrés hídrico foliar espacial a partir de imágenes térmicas obtenidas de un vehículo aéreo no tripulado (VANT) y se relacionó con la humedad volumétrica del suelo para saber el grado de correlación lineal y a través de la ecuación resultante de la relacionar estas dos variables saber cuánto de agua requiere la planta en el riego.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La agricultura es actividad que demanda el 70% de agua disponible para las actividades económicas del hombre (FAO, 2014), y a la vez, es la que más contamina y. Ante la creciente demanda mundial de alimentos en cantidad y calidad y ante una prematura crisis del agua, surgen nuevos paradigmas en uso y racionamiento sostenible de los recursos hídricos en la agricultura.

En Lambayeque, la siembra de arroz (*Oryza sativa*), es la actividad base de la economía de los agricultores, desarrollándose de manera no tecnificada e irrigándose por inundación; demanda una cantidad de aproximadamente 14,000 m³ de agua por hectárea en una campaña, contribuyendo así al uso excesivo de este recurso en ciertos sectores de la región y dejando sin agua a otros. Por otra parte, el exceso de riego en este cultivo origina salinidad de los suelos, propagación de enfermedades para los cultivos, etc.

Frente a esta problemática, se ha visto en la necesidad de investigar nuevas metodologías para la planificación y programación del riego en el cultivo de arroz. Entre las nuevas tendencias, se está experimentando regar por el método de secas intermitentes (en el INIA de Chiclayo) y por goteo (en Ferreñafe). Este último, requiere de un control estricto en cuanto a la cantidad, tiempo y frecuencia de riego, para lo cual se utilizan equipos que miden la humedad del suelo.

Para una agricultura eficiente en la utilización del recurso hídrico mediante el sistema de goteo en cualquier cultivo, se utilizan sensores remotos de humedad instalados en campo y conectados a una computadora receptora para monitorear el contenido de humedad del suelo con la finalidad de aplicar riego solamente al área que tiene déficit hídrico.

Existen otras maneras de identificar cuándo la planta está entrando a estrés hídrico y saber cuándo y cuánto regar; una metodología es a través del índice de estrés hídrico foliar (CWSI), obtenido mediante la temperatura de la hoja del cultivo (temperatura foliar). Justamente esta investigación se centró en lo último, en determinar el CWSI del cultivo de arroz (específicamente en la zona situada al norte de la ciudad de Ferreñafe) a partir de imágenes térmicas colectadas por un vehículo aéreo no tripulado (VANT) y relacionarlo con la humedad del suelo, para

obtener una programación de riego de manera más precisa, la cual contribuya a reducir la cantidad de agua utilizada en este cultivo; cubriendo la colecta de datos con el dron en campo al 100%, a diferencia de los sensores de humedad que no cubren toda el área de cultivo.

En región Lambayeque y en todo el norte aún no se ha investigado al respecto, siendo este proyecto el pionero, abriendo una serie de horizontes a nuevos conocimientos en la mejora agrícola del riego en arroz, ya que la costa norte del Perú es productora de este cereal por excelencia.

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Objetivo general

- Estimar el índice de estrés hídrico foliar del cultivo de arroz a partir del procesamiento de imágenes térmicas colectadas por un sensor térmico de un vehículo aéreo no tripulado (VANT) y relacionarlo con la humedad de suelo, con fines de programación del riego.

1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar umbrales superior e inferior de estrés hídrico a partir de la temperatura obtenida mediante el sensoramiento térmico del follaje del cultivo de arroz.
- Determinar el índice de estrés hídrico foliar del cultivo de arroz a partir de la temperatura obtenida de las imágenes térmicas del VANT.
- Relacionar el índice de estrés hídrico foliar con la humedad volumétrica del suelo para estimar la humedad actual de este.

1.4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

La presente investigación se enfocará en la estimación del índice de estrés hídrico foliar del cultivo de arroz (CWSI) y relacionarlo con la humedad volumétrica del suelo, con la finalidad de programación de riego, para saber el contenido de humedad del suelo mediante la temperatura foliar. Esto se realiza ante una creciente demanda de alimentos a nivel mundial y ante una escasez de agua cada vez más palpable, ya que el arroz es el cultivo que demanda de más

agua en el Valle Chancay Lambayeque (dentro del cual se encuentra Ferreñafe) y en todo el mundo, regándose por inundación, con una lámina constante de agua.

La estimación del CWSI es un método alternativo que facilita conocer el estado de humedad del suelo mediante la toma de datos por medio de un VANT equipado con cámara térmica que cubre el 100% del área cultivada. Por otra parte, este mecanismo facilita el ahorro en consumo de agua en esta actividad agrícola, en un sistema de riego por goteo, ya que Lambayeque es una zona árida con escasas precipitaciones anuales. Asimismo, con el vuelo del VANT para la recolección de datos se omitiría o disminuiría la instalación por todo el campo de equipos de medición de humedad del suelo, reduciendo compras y reparaciones de estos.

1.5. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

La limitante más importante que se ha tenido en el desarrollo de la presente investigación ha sido la falta de disponibilidad un VANT juntamente con su cámara térmica a tiempo completo; para tener bandas térmicas a lo largo de todas las fases fenológicas del cultivo, y con esto tener una información de temperatura foliar más detallada y completa. El VANT con el que se trabajó se tenía que trasladar desde la ciudad de Lima, previos trámites de permiso, corriendo el riesgo de sufrir algunas averías en el camino, por lo que se hizo el requerimiento solamente para fechas clave en el desarrollo del cultivo de arroz.

No se contó con una estación meteorológica propia, por lo que se tuvo que solicitar la data meteorológica de la estación experimental Vista Florida, la cual era la más cercana y la más operativa. Sin embargo, no se podía acceder a la base de datos durante los meses de la investigación, debido a que la información estaba encriptada y el INIA no contaba con el personal especializado para procesar la información. Esto ocasionó que retrasase el desarrollo en gabinete de la investigación hasta que después de unos meses se solucionó el inconveniente.

Por otro lado, la información bibliográfica de investigaciones desarrolladas en el Perú bajo condiciones de costa es escasa, sin embargo se disponía de dos tesis similares realizadas en la Universidad Agraria La Molina.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

En Perú, es la primera vez que se realiza este tipo de investigación utilizando un VANT para la captura de imágenes térmicas. Algunos estudios que se han realizado en este tema y otros con relación se mencionan a continuación.

Teresita (2013) en su tesis denominada “Evaluación del estrés hídrico y de los factores que lo afectan, usando información teledetectada”, generó dos índices de estrés hídrico, basados en la evaporación relativa que no requerían datos de campo, solamente datos teledetectados como las imágenes de T_s , NDVI, T_d y reflectancia en el SWIR, aplicables con diferentes misiones satelitales; obteniendo como resultado una correlación de 0.82 entre la humedad del suelo y el contenido de humedad de cada pixel,

En Perú, recién se empieza a investigar en este campo en la Universidad Nacional Agraria La Molina. Durand (2018) desarrolló su tesis denominada “Caracterización del índice de estrés hídrico del cultivo de arroz mediante el uso de sensores térmicos y de humedad del suelo en La Molina, Lima - Perú”, en la cual estimó la humedad volumétrica del suelo, mediante el cálculo del índice de estrés hídrico foliar de cultivo de arroz, a partir de imágenes térmicas captadas con una cámara térmica y sensor térmico de termocuplas. En esta investigación se obtuvo una correlación moderada de -0.54 entre la humedad del suelo y el índice de estrés hídrico foliar, no pudiéndose realizar una estimación precisa debido al Fenómeno del Niño ocurrido en el 2017. Por otra, en su recomendación final, invita a realizar el mismo estudio utilizando imágenes a partir de un vehículo aéreo no tripulado, a lo cual, esta investigación ha respondido.

La última tesis realizada en Perú, también fue desarrollada en la Universidad Nacional Agraria La Molina. Villar (2019), desarrolló su tesis denominada “Estrés hídrico del cultivo de arroz IR 71706 vía termografía mejorada y calibrada del área del dósel en la UNALM”, cuya finalidad fue evaluar la variación del CWSI del cultivo de arroz IR 71706 mediante la medición de temperatura foliar vía termografía infrarroja mejorada y calibrada con sensores térmicos de termocuplas y su relación con la humedad volumétrica del suelo. La relación entre el CWSI y la

humedad volumétrica del suelo se obtuvieron a profundidades de 12 cm y 20 cm, cuyos coeficientes fueron de (-0.440, -0.306 y -0.421) a 12 cm y (-0.489, -0.347 y -0.486) a 20 cm, para correlaciones de Pearson, Kendall y Spearman, respectivamente. En esta investigación, la mejor correlación se obtuvo a 20 cm de profundidad, ya que a esa profundidad el suelo se evapora menos. Por otro lado, recomienda realizar la misma investigación, utilizando VANT, para trabajar en una escala de área mayor.

En la India se han desarrollado varias investigaciones en riego por goteo en cultivo de arroz, con la finalidad de disminuir el consumo de agua. Entre ellas destacamos la realizada por Rajeev *et al* (2018), quienes evaluaron la producción de arroz por tres métodos de riego, goteo, aspersión e inundación, cuyo rendimiento mayor fue el arroz irrigado por goteo, con una producción de 6,950 Kg/ha y un consumo de 4,073 m³/ha de agua.

2.2. BASES TEÓRICAS

El agua que se evapora de una superficie foliar o vegetal funciona como un estabilizador de la temperatura de las hojas, frente a la evapotranspiración que demanda la atmósfera.

Jackson, *et al* (como se cita en López, *et al.* 2009), “presentaron la teoría del balance energético que separa la radiación neta en calor sensible del aire y calor latente que incide en la transpiración. Cuando el cultivo se somete a estrés hídrico, los estomas se cierran, la transpiración decrece y la temperatura de la hoja aumenta. Cuando una planta transpira sin estrés hídrico, la temperatura de la hoja es entre 1 - 4 °C menor que la temperatura ambiental, en este caso el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) es 0. Cuando la transpiración decrece, la temperatura de la hoja asciende y puede alcanzar de 4 a 6 °C más que la temperatura del aire. En este caso, el déficit hídrico es alto, la transpiración de las hojas se ve drásticamente reducida con el incremento de la temperatura foliar; cuando la planta está muerta o no transpira durante mucho tiempo el CWSI es 1” (p.98).

Idso, *et al* (como se cita en López, *et al.* 2009) “desarrollaron el método empírico (CWSI) para la cuantificación de la humedad atmosférica y de la planta

en regiones áridas, la cual depende de la determinación “de las líneas base sin estrés hídrico” que facilitan la normalización de cambios en la temperatura del dosel para condiciones ambientales” (p.98).

Jackson, *et al* (como se cita en López, *et al.* 2009) “modificaron el CWSI para incluir una predicción más teórica de los efectos del clima sobre la temperatura del dosel que incluye explícitamente el déficit de presión del vapor de agua, la radiación neta y la resistencia aerodinámica” (p.99). Keener y Kircher (como se cita en López, *et al.* 2009) nos dice que esta “aproximación teórica para determinar la humedad atmosférica que se utiliza en el CWSI es más precisa que la aproximación empírica, particularmente en climas más húmedos” (p.99).

El índice de estrés hídrico del cultivo según Idso y Jackson *et al* (como se cita en López, *et al.* 2009), está definido como:

$$CWSI = \frac{[(T_c - T_a)_m - (T_c - T_a)_{li}]}{[(T_c - T_a)_{ls} - (T_c - T_a)_{li}]}$$

En donde T_c es la temperatura del cultivo; T_a es la temperatura del aire; m es el sub índice que denota la diferencia medida entre las dos temperaturas; li es el límite inferior que denota la diferencia entre las dos temperaturas cuando la evapotranspiración no está restringida por la disponibilidad del agua, de modo que T_c es el valor más bajo para las condiciones del clima; ls es el límite superior que denota la diferencia hipotética entre las dos temperaturas cuando la evapotranspiración es cero, como resultado de la falta de disponibilidad de agua en el sistema suelo, planta y atmósfera.

Por otro lado Jones (2004) desarrolló una formula simplificada:

$$CWSI = \frac{(T_{foliar} - T_{húmeda})}{(T_{seca} - T_{húmeda})}$$

En donde T_{foliar} es la temperatura del dosel vegetativo (temperatura del cultivo); T_{seca} es la temperatura del máximo estrés hídrico (temperatura seca del cultivo) y $T_{húmeda}$ es la temperatura de mínimo estrés hídrico del cultivo.

Idso y Jackson *et al* (como se cita en López, *et al.* 2009) afirman que “el CWSI varíe entre 0 a 1 cuando las plantas van de una condición bien regada a una condición totalmente estresada, puesto que no es normalmente factible medir simultáneamente la temperatura del cultivo sin estrés y un cultivo con estrés”

En esta investigación se trabajó con la formula simplificada de Jones, debido a que se acoge a las condiciones en las que se realizó dicha labor. Asimismo, según Jones (2004), la temperatura de mínimo estrés hídrico o temperatura húmeda corresponde a la temperatura en la cual finaliza el adormecimiento nocturno de la hoja y su temperatura se iguala a la temperatura del aire durante las primeras horas de la mañana.

Para la caracterización de las temperaturas umbrales húmeda y seca, Durand (2018) en su tesis determinó y caracterizó que las temperaturas húmeda y seca del aire se daban a las 8:00 horas y a las 13:00 horas respectivamente para cada fase fenológica, esto, después de analizar la temperatura horaria del aire con una estación meteorológica “in situ”, durante gran parte del desarrollo fenológico del cultivo.

Por otro lado, Villar (2019), determinó que las horas de la mañana en la que la temperatura del cultivo es igual a la temperatura del aire, es decir, la hora en la que se da la temperatura húmeda varía entre las 07:40 y 08:15 horas y la hora en que se da la temperatura seca varía entre las 12:20 y 13:10 horas. Esto, debido a la fase fenológica del cultivo.

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

2.3.1. Cultivo de arroz

El cultivo de arroz (*Oryza sativa*), pertenece a la familia de las Poáceas, cuya técnica de riego se hace por inundación, desde el siglo XV A.C. aproximadamente. “El arroz es una planta de suelos húmedos e inundados, cuyo sistema radicular principal es adventicio” (Moquete, 2010, p. 13). Este cereal, se cultiva tanto en secano como en riego, siendo con este último (riego por inundación) con el que se consigue la mayor producción. “El cultivo de secano se observa en Centroamérica, Colombia y Brasil, principalmente”. (Moquete, 2010, p. 14).

Este cultivo es el principal de la región Lambayeque y base de la economía local, regándose por inundación en una agricultura tradicional, con una infraestructura hidráulica de conducción y distribución en su mayoría sin revestir; causando pérdidas considerables de agua, pues la eficiencia de conducción, distribución y aplicación es muy baja.

2.3.2. Estrés abiótico

El estrés abiótico constituye el déficit por falta o abundancia de agua, por temperaturas muy bajas o muy altas, por salinidad del suelo, contaminación del suelo y aire por agentes tóxicos, etc.

Benitez, A. (2005). Argumenta que:

“La disponibilidad de agua y nutrientes, los factores que imponen un déficit hídrico a los cultivos (temperatura, insolación, salinidad), así como los contaminantes presentes en el medio, limitan el crecimiento y la productividad vegetal. La sequía, la salinidad y la deshidratación por bajas temperaturas constituyen una fuente directa de estrés osmótico, mientras que la congelación y la hipoxia contribuyen también directamente a dicho estrés, porque influyen en la captación y la pérdida de agua” (p.56).

2.3.3. Estrés hídrico

Según Levitt (como se citó en Moreno, L. 2008):

“El estrés por déficit hídrico o por sequía se produce en las plantas en respuesta a un ambiente escaso en agua, en donde la tasa de transpiración excede a la toma de agua. El déficit hídrico no sólo ocurre cuando hay poca agua en el ambiente, sino también por bajas temperaturas y por una elevada salinidad del suelo. Estas condiciones, capaces de inducir una disminución del agua disponible del citoplasma de las células, también se conocen como estrés osmótico” (p.180).

2.3.4. Estrés hídrico foliar

Según De Santa Otalla, F., *et al.* (2005), el estrés hídrico foliar:

“Comienza cuando el contenido de humedad de los tejidos (intra y extra celular) se desvía del óptimo. Esto ocasiona trastornos en el desarrollo de las plantas en el crecimiento celular mayormente, además de inhibición en la actividad enzimática y la división celular, también altera el desarrollo reproductor provocando incluso la caída de las hojas y frutos” (p.149).

2.3.5. Estrés Térmico

Walter, *et al.* (Como se citó en Argenteal, *et al.*, 2017). Definen al estrés térmico “como el aumento en la temperatura por encima de un determinado umbral, por un lapso suficiente para causar efectos negativos irreversibles en el desarrollo y rendimiento de los cultivos”. (p.58).

2.3.6. Índice de estrés hídrico foliar

López, *et al.* (2009) afirman que el “índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI), se basa en la determinación de la tasa de transpiración actual de un cultivo mediante la medición de la temperatura del dosel (cubierta vegetal) y el déficit de presión de vapor” (p. 97).

López, *et al.* (2009) manifiestan que:

“El CWSI se basa en la teoría del balance de energía en una superficie, las funciones lineales del diferencial de temperatura entre el cultivo y el aire y el déficit de presión de vapor, las cuales dependen del cultivo y las condiciones atmosféricas. La termometría infrarroja es una herramienta sencilla, práctica y confiable para la estimación del estrés hídrico, la programación del riego y la predicción de rendimiento” (p. 97).

Garrot, *et al* (como se cita en López, *eat al.* 2009) nos dice que:

“El método del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI), es una medida de la transpiración que ocurre en una planta en el tiempo de medición, mediante el registro de la temperatura de la planta y el déficit de presión de vapor del agua. Este enfoque metodológico es necesario para la

correcta programación del riego en cultivos agrícolas en campo abierto. Las mediciones del estrés hídrico de los cultivos combinado con sistemas eficientes de riego permiten maximizar el rendimiento a través de un manejo eficiente del riego” (P.98).

2.3.7. Termografía

“La termografía, es una técnica utilizada en la evaluación no destructiva” (Balageas, 2007). Esta tecnología se aplica en la agricultura, en la evaluación de cultivos con la finalidad de facilitar y agilizar los diagnósticos de estrés hídrico, clorofila, etc. mediante la captura de imágenes térmicas con una cámara de la misma naturaleza y el análisis y determinación de la temperatura, a través de los píxeles.

2.3.8. Sensores térmicos

Gonzáles, *et al*, (2015) afirman que existen diversos tipos de equipos electrónicos sensibles al calor, entre ellos, los sensores multispectrales de alta resolución como los sensores de Airinov y Parrot, cuyas características son:

- **Multispec 4C de AIRINOV:** “es un sensor multispectral diseñado especialmente para agricultura. Tiene una resolución en suelo de 5 – 15cm /px y está equipado con un lente gran angular; además, permite la corrección de la señal de reflectancia” (Airinov, 2016).
- **Parrot Sequoia:** “es un sensor multispectral del tamaño de una cámara GoPro que posee cuatro bandas multispectrales (verde, rojo, rojo de punta e infrarrojo cercano) implementadas para determinar la salud del cultivo” (S. Parrot, 2016).

Estos sensores y cámaras pueden instalarse en un Vehículo Aéreo no Tripulado, comúnmente conocido como drone que generalmente va equipado por una cámara de video para realizar diversas labores tales como vigilancia aérea, toma de fotografías, también es utilizado para obtener información geográfica, en la generación de planos, mapas. En la agricultura se utiliza para detectar plagas,

monitoreo del cultivo, determinación del estrés hídrico mediante la toma de imágenes térmicas, etc.

2.3.9. Procesamiento de imágenes térmicas

En primer lugar, es necesario instalar puntos de control en el terreno a fotografiar, los cuales deben estar debidamente pintados y georreferenciados con coordenadas UTM absolutas. Una vez realizado el vuelo con el VANT, se descarga el mosaico de imágenes térmicas de la cámara Flir y se realiza una selección y depurado de las imágenes defectuosas en el software Flir para después cargarlos al software PIX4D en el que se unirán todas las imágenes que en su conjunto conformarán una sola imagen o fotografía de toda la parcela estudiada. Esto gracias a que la parcela cuenta con puntos de control georreferenciados en cada vértice y centro de gravedad, los cuales al ser captados por la cámara térmica ayudan a ubicar exactamente la imagen sobre el terreno natural, combinando todo el mosaico de imágenes en una sola.

Finalmente, la imagen resultante es exportada en formato TIFF, la cual contiene en cada pixel información de temperatura, fecha y hora de captura y ubicación UTM exacta.

Los datos de temperatura contenidos en cada pixel de la imagen resultante son corregidos mediante ecuaciones en el software ArcGis, según factores de corrección y otros datos que el investigador disponga.

2.3.10. Humedad del suelo

La humedad del suelo es el contenido de agua que este contiene entre su espacio poroso. Según Porta, *et al*, (2003) “se refiere a la cantidad de agua (masa o volumen) que se halla en cada posición de un suelo en un momento determinado” (p.311).

Cuando la partícula de agua es retenida por el coloide del suelo con una fuerza superior a las 15 atmósferas se dice que el suelo está en punto de marchitez permanente; cuando el agua es retenido por el coloide del suelo con una fuerza de 1/3 de atmósfera, se dice que está en capacidad de campo, y finalmente, cuando los poros del suelo están repletos de partículas de agua, se dice que el

suelo está saturado. El estado de capacidad de campo del suelo es el óptimo para la producción agrícola en el que la planta no está en estrés hídrico.

2.3.11. Programación de riego

La programación del riego en la agricultura responde a tres preguntas, ¿Cuánto regar?, ¿Cuándo regar? y ¿Cómo regar? La cantidad, el periodo y la metodología de riego, responden a una serie de estudios agronómicos, edafológicos y meteorológicos.

Schugurensky y Capraro (2013) comentan que:

“El riego agrícola adquiere su verdadera importancia cuando la programación del mismo es la correcta: ello implica determinar adecuadamente el periodo de tiempo entre riegos sucesivos y la cantidad de agua aplicada en cada periodo. En este sentido, el control del sistema de riego juega un rol importante a la hora de llevar a cabo una determinada estrategia de riego sobre el cultivar. El sistema de riego puede ser controlado de forma manual o automática. A su vez un sistema de riego automático puede ser a lazo abierto (temporizado) o a lazo cerrado” (p.4).

2.4. HIPÓTESIS

2.4.1. Hipótesis general

- El procesamiento de imágenes térmicas colectadas por un VANT permite estimar el índice de estrés hídrico foliar del cultivo de arroz, el cual tiene una relación inversa y significativa con la humedad volumétrica del suelo.

2.4.2. Hipótesis específicas

- Se pueden identificar umbrales superior e inferior de estrés hídrico a partir de la temperatura foliar del cultivo de arroz.
- El índice de estrés hídrico foliar del cultivo de arroz se puede estimar a partir de la temperatura foliar obtenida de imágenes térmicas captadas por un VANT.

- La humedad actual del suelo se puede determinar relacionando el índice de estrés hídrico foliar con la humedad volumétrica del suelo, mediante una ecuación lineal.

2.5. VARIABLES

2.5.1. Definición conceptual de la variable

2.5.1.1. Variable independiente

- **Temperatura foliar**

La temperatura foliar expresa el grado de agitación molecular de las hojas de un cultivo, en este caso del cultivo de arroz; esta variable, se utilizará en esta investigación como indicador fisiológico temprano del estrés hídrico del cultivo de arroz.

2.5.1.2. Variable dependiente

- **Humedad volumétrica del suelo**

La humedad volumétrica del suelo expresa el contenido de humedad de este con relación a su volumen total.

2.5.2. Definición operacional de la variable

- **Temperatura foliar**

Se expresa en grados Celsius o centígrados (C°) y su valor se obtiene mediante fotografías aéreas captadas por una cámara térmica instalada en un drone.

- **Humedad volumétrica del suelo**

Se expresa en porcentaje (%) y se cuantifica al rango de punto de marchitez permanente y capacidad de campo.

2.5.3. Operacionalización de la variable

La operacionalización de las variables se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Operacionalización de las variables.

| Objetivo general: | Estimar el índice de estrés hídrico foliar del cultivo de arroz a partir del procesamiento de imágenes térmicas colectadas por un sensor térmico de un vehículo aéreo no tripulado (VANT) y su relación con la humedad de suelo, con fines de programación del riego, en el cultivo de arroz. | | |
|---|---|--|--------------------|
| Objetivos específicos | Variables | Dimensiones | Indicadores |
| Identificar umbrales superior e inferior de estrés hídrico a partir de la temperatura obtenida mediante el sensoramiento térmico del follaje del cultivo de arroz. | Temperatura Foliar | Temperatura por encima de la T° húmeda. | Mayor a los 20°C |
| | | Temperatura foliar por debajo de la T° seca. | Menor a los 31.5°C |
| Estimar el índice de estrés hídrico foliar del cultivo de arroz a partir de la temperatura obtenida de las imágenes térmicas del VANT. Relacionar el índice de estrés hídrico foliar con la humedad volumétrica del suelo para estimar la humedad actual de este | Humedad Volumétrica | Umbral superior (saturación) | Por encima del 48% |
| | | Umbral inferior (en función de manejo del riego) | Entre 28% y 31.7% |

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

Según su tipo, esta es una investigación experimental cuantitativa y según su nivel, es descriptiva y correlacional.

3.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁMBITO DE LA INVESTIGACIÓN

El ámbito de estudio de la investigación es el fundo Zapote Figueroa, ubicado entre en las coordenadas UTM este: 634631.446 y norte: 9270708.370, cerca de la ciudad de Ferreñafe, dentro del valle Chancay Lambayeque, en la región Lambayeque. Se caracteriza por ser una zona semiárida, con una precipitación media anual de 22 mm y temperaturas media anual con promedio mínimo de 15.4°C y promedio máximo de 28.8 °C (según SENAMHI); su topografía es plana, con suelos arcillosos; la actividad económica más importante es la agricultura, resaltando la siembra de arroz entre los meses de enero a mayo, en donde se registran las mayores temperaturas del año, además, entre estos meses de tiempo precipita en la sierra de Cajamarca, que es de donde se traslada el recurso hídrico para la agricultura en todo el valle Chancay Lambayeque.



Figura 1. Parcela experimental. Tratamiento por goteo (norte) e inundación (sur).

Fuente: Fotografía tomada con el VANT.

3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

La población fue un área de 1,680 m² de arroz, de la cual la mitad fue sembrada bajo riego por goteo y la otra mitad en riego por inundación; en líneas de cinco (05) metros, las cuales se repiten en ocho (08) bloques o tratamientos en cada sistema (ver figura 2).

Las muestras para el análisis de humedad volumétrica del suelo, fueron las plantas de arroz ubicadas en el centro de gravedad de cada bloque del tratamiento por goteo.

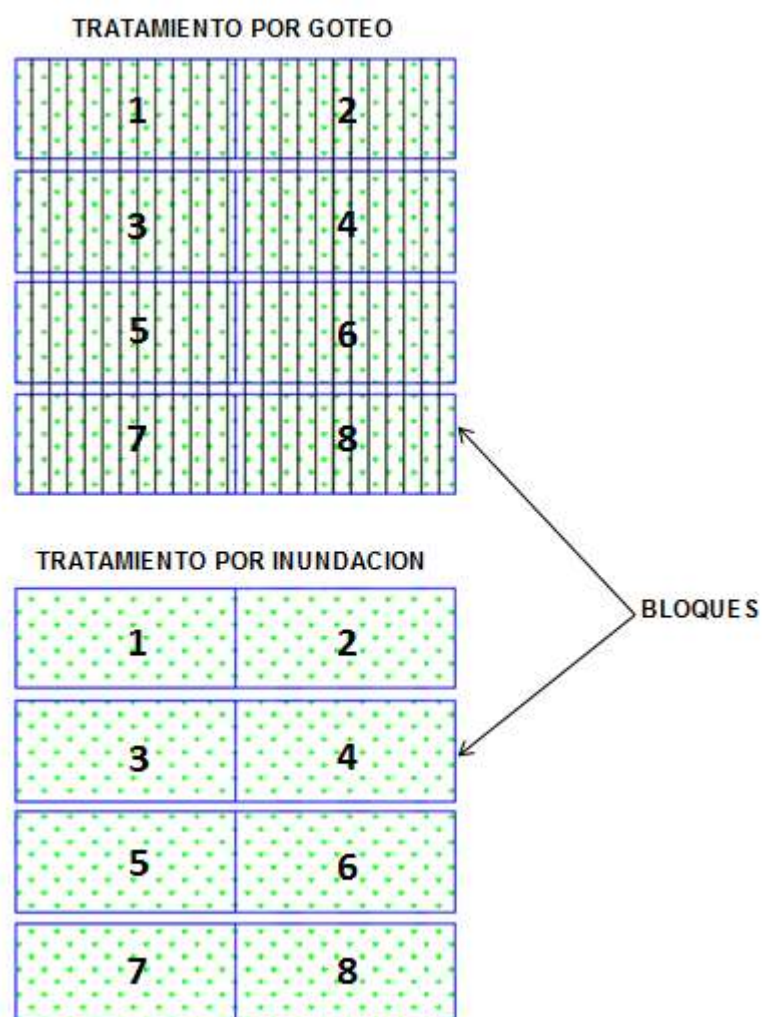


Figura 2.Distribución de tratamientos y sus respectivos bloques.

Fuente: Elaboración propia.

La distribución exacta de los tratamientos y bloques se detallan en el plano, en el anexo 7.

3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

Se realizaron lecturas directas en campo para la recolección de datos como temperatura foliar y humedad del suelo. La temperatura se obtuvo de las imágenes térmicas colectadas por una cámara térmica instalada en un VANT, el cual voló en el terreno, cubriendo el 100% de la superficie cultivada. La humedad del suelo se obtuvo de las lecturas directas gracias al equipo de medición de humedad de suelo TDR (Reflectometría de Dominio Temporal).

3.5. VALIDEZ Y CONFIABILIDAD DEL INSTRUMENTO

En la tabla 2 se detallan las características de los instrumentos, en las que se expresa la confiabilidad, la cual lleva a tener una validez convincente.

Tabla 2. Equipos, insumos y herramientas computacionales, utilizados en el desarrollo de la investigación.

| EQUIPO O INSUMO | CARACTERÍSTICAS | USO O APLICACIÓN |
|---|---|--|
| VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO -DRONE | <ul style="list-style-type: none">• Marca: DJI• Modelo: Matrice 210• Hélices de 17 pulgadas.• Aplicación móvil DJI GO 4 y DJI FlightHub.• Gimball especial para alojar 2 sensores giroestabilizados en los tres ejes con motores brushless de gran capacidad de respuesta a la estabilización de los planos.• Fabricado en fibra de carbono. | <ul style="list-style-type: none">• Se utilizó para acoplar las cámaras, para la toma aérea de fotografías térmicas y RGB en la que se cubrió todo el terreno. |
| CÁMARA RGB | <ul style="list-style-type: none">• Marca: Sony Alfa• Modelo: 7RII 42.4 MP - 35 mm, full FRAME.• Sensor de fotograma completo CMOS con retroiluminación y 42.4 MP full FRAME Sensor de 35mm.• Amplio rango de ISO, de 50 a 102 400. | <ul style="list-style-type: none">• Permitió la captura de imágenes RGB (imágenes normales). |
| CÁMARA TÉRMICA | <ul style="list-style-type: none">• Marca: FLIR Vue Pro.• Modelo: R 640• Operatividad de - 20 °C a 50 °C.• Rango espectral de 7.5 - 13 µm.• Resolución de 640 x 512 pixeles. | <ul style="list-style-type: none">• Permitió la captura de imágenes térmicas de las que se extraería la temperatura foliar. |

continúa...

| TDR | <ul style="list-style-type: none"> • Marca: FieldScout • Modelo: 300 • Unidades de medición: Porcentaje volumétrico de contenido de agua. • Resolución: 0.1% de contenido volumétrico de agua. • Precisión: $\pm 3,0\%$ de contenido volumétrico de agua con una conductividad eléctrica $<2 \text{ mS/cm}$. • Rango: 0% a saturación (saturación típicamente alrededor de un 50% volumétrico de agua). | <ul style="list-style-type: none"> • Equipo que se empleó para tomar lecturas de humedad volumétrica del suelo. |
|-----------------------------------|--|--|
| WATERMARK | <ul style="list-style-type: none"> • Modelo 200 SS. • Tamaño: 22 cm de diámetro por 50 cm de largo. • Principio de medida: Resistencia con bloques de yeso. • Rango de trabajo: 10 a 200 kPa. • Precisión: 5% | <ul style="list-style-type: none"> • Para medir la tensión del suelo. |
| TERMÓMETRO INFRAROJO | <ul style="list-style-type: none"> • Marca: Control Company • Modelo: 4484 • Rango de equipo: -50 hasta 1000 °C. • Resolución: 0.1 °C. • Precisión: $\pm 1 \text{ °C}$. | <ul style="list-style-type: none"> • Para medir la temperatura foliar del cultivo. |
| ESTACIÓN GEODÉSICA | <ul style="list-style-type: none"> • Marca: Topcon • Modelo: Hiper SR | <ul style="list-style-type: none"> • Para georreferenciar de manera precisa de los puntos de control. |
| SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO | <ul style="list-style-type: none"> • Presión de trabajo: • Caudal de gotero: • Uniformidad de riego: • Distancia entre goteos: | <ul style="list-style-type: none"> • Sistema de riego presurizado para regar el cultivo de arroz. |
| INSUMOS | CARACTERÍSTICAS | USO O APLICACIÓN |
| SEMILLA DE ARROZ | <ul style="list-style-type: none"> • Semilla sin remojar | |
| FERTILIZANTES | <ul style="list-style-type: none"> • Para el desarrollo del cultivo | <ul style="list-style-type: none"> • Para el desarrollo del cultivo |
| PESTICIDAS | | |
| SOFTWARE | CARACTERÍSTICAS | USO O APLICACIÓN |
| PIX4D | <ul style="list-style-type: none"> • Software de fotogrametría para mapeo profesional de drones. | <ul style="list-style-type: none"> • Para el procesamiento de las imágenes térmicas y RGB, con la finalidad de obtener una sola imagen de la parcela. |

continúa...

| | | |
|-------------------|---|---|
| ARCGIS | <ul style="list-style-type: none">• Software empleado en el procesamiento de datos de información geográfica. | <ul style="list-style-type: none">• Para el procesamiento de los píxeles de temperatura de las imágenes térmicas. |
| FLIR TOOLS | <ul style="list-style-type: none">• Software empleado para trabajar con imágenes térmicas. | <ul style="list-style-type: none">• Para procesar y calibrar imágenes térmicas. |
| EXCEL | <ul style="list-style-type: none">• Software informático para realizar cálculos matemáticos, contables y financieros. | <ul style="list-style-type: none">• Software que se utilizó como herramienta de cálculo para realizar gráficos y determinar ecuaciones. |

Fuente: Elaboración propia

3.6. PLAN DE RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

Previo a la colecta de datos para esta investigación, se describe brevemente las actividades realizadas desde la preparación del terreno:

- El día 06 enero de 2019 se preparó el terreno para brindar las condiciones necesarias para el desarrollo del cultivo.
- El día 10 enero de 2019 se instaló el sistema de riego por goteo, con goteros a cada 20 cm en los laterales de riego.
- El 13 de enero se realizó la siembra a chorro continuo y en seco, en líneas de 05 metros, con 6 gr/línea y una densidad de siembra de 60 kg/ha. Esto se repitió en 08 bloques para los tratamientos por goteo e inundación.
- El 15 de enero se realizó el primer riego.

La colecta de datos de temperatura foliar mediante el vuelo del VANT y de humedad del suelo mediante el TDR se realizaron exclusivamente en el tratamiento por goteo, ya que en el tratamiento por inundación la humedad del suelo siempre estuvo al 100%, es decir, este siempre estuvo inundado. El tratamiento por inundación se realizó con la finalidad exclusiva de comparar rendimientos en grano y consumo de agua, en una investigación paralela a esta tesis.

Los datos de campo se colectaron en 02 etapas, la primera a los 66 días después de la siembra, cuando el arroz se encontraba finalizando la fase

vegetativa, en pleno estado de macollamiento, realizándose el primer vuelo del VANT y lectura de datos de humedad durante los días 20, 21 y 22 de marzo.

La segunda etapa de colecta de datos se realizó cuando el cultivo se encontraba finalizando la fase reproductiva e iniciando la fase de maduración, entre los estados de floración y formación de grano lechoso. A los 113 días después de la siembra se colectaron datos de temperatura de imágenes y de humedad volumétrica; durante los días 06, 07, 08 y 09 de mayo; realizándose 01 vuelo por día, en cada etapa.

En la tabla 3 se muestra el cronograma de recolección de datos de temperatura y humedad y en la figura 3 se indica el desarrollo fenológico del cultivo de arroz sembrado en la parcela experimental.

Tabla 3. Cronograma de recolección de datos según las fases fenológicas del cultivo.

| Acción | Días | Días después de la siembra | Fase fenológica del cultivo | Estado fenológico del cultivo |
|--|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| Captura de imágenes térmicas con el VANT y lectura de humedad volumétrica del suelo con TDR. | 20, 21 y 22 de marzo. | 66, 67, 68. | Vegetativa | Macollamiento |
| | 05, 06, 07, 08, 09 de mayo. | 113, 114, 115, 116 | Reproductiva y maduración | Floración y grano lechoso |

Fuente: Elaboración propia

Es importante aclarar que el VANT no estaba a completa disposición en esta investigación, al pertenecer a la Universidad Agraria La Molina, se tenía que gestionar con anticipación su traslado hacia la ciudad de Chiclayo, ya que dicho equipo se utilizaba en más investigaciones en Lima. Es por ello que solamente se realizaron vuelos estratégicos, en etapas fenológicas claves.



| | Emergencia | Plántula | Macollamiento | Primordio floral | Estado de huso | Floración | Grano lechoso | Grano pastoso | Grano ceroso | Madurez fisiología |
|------|-----------------|----------|---------------|-------------------|----------------|-----------|--------------------|---------------|--------------|--------------------|
| DDS | (0-8) | (8-36) | (36-70) | (70-81) | (81-91) | (91-105) | (105-123) | (123-136) | (136-142) | (142-148) |
| DP | 8 | 28 | 34 | 11 | 10 | 14 | 18 | 13 | 6 | 6 |
| GDD | 129.05 | 426.84 | 569.05 | 170.05 | 139.65 | 215.1 | 267.85 | 172.7 | 75.4 | 84.2 |
| GDD | 1124.94 | | | 524.8 | | | 600.15 | | | |
| Fase | Fase vegetativa | | | Fase reproductiva | | | Fase de maduración | | | |
| DP | 70 | | | 35 | | | 43 | | | |

DDS = Días después de la siembra.

DP = Duración de periodo

GDD = Grados días de calor

Figura 3. Duración y grados días de calor según fase fenológica del cultivo de arroz en Ferreñafe, Lambayeque.

Fuente: Elaboración a partir de información del Area Experimental de Riego - UNALM.

Para responder a los objetivos específicos planteados en la presente investigación, se ha creído conveniente explicar cómo se identificaron y determinaron las temperaturas umbrales húmeda y seca, cómo se determinó el CWSI, finalmente, como se relacionó este último con la humedad volumétrica del suelo.

Temperaturas umbrales:

Según Durand (2018) las temperaturas húmeda y seca del aire se dan a las 8:00 horas y a las 13:00 horas respectivamente para cada fase fenológica. Por otro lado, Villar (2019), determinó que las horas de la mañana en la que la temperatura del cultivo es igual a la temperatura del aire, es decir, la hora en la que se da la temperatura húmeda varía entre las 07:40 y 08:15 horas y la hora en que se da la temperatura seca varía entre las 12:20 y 13:10 horas.

En base a lo revisado en la literatura, se tomó como:

- Temperatura húmeda, la que se registra entre las 07:00 y las 08:00 horas.
- Temperatura seca, la que se registra a las 13:00 horas.

Las temperaturas umbrales se obtuvieron de la estación meteorológica automática de Vista Florida, dentro de las instalaciones del INIA, ubicado en el distrito de Picsi, por ser la estación más cercana al lugar de la investigación.

Captura de imágenes térmicas:

- Primero, se instalaron puntos de control rectangulares de 0.25x0.25 m, cubiertos con papel aluminio, en las esquinas de la parcela y centro de gravedad de la misma. Estos sirvieron como puntos de georreferencia al momento de procesar y unir las imágenes térmicas y RGB, ya que dichos puntos contaban con coordenadas absolutas obtenidas gracias al GPS diferencial que se utilizó para dicha labor.
- Se aseguró que los equipos estén en correcto funcionamiento, luego se instalaron dos cámaras en el drone, la cámara térmica y RGB, para capturar imágenes térmicas y RGB respectivamente; se configuró el plan de vuelo a seguir del VANT seguido de su calibración.

- Se realizó el vuelo con el VANT a una altura de 20 metros de la superficie del terreno natural, siguiendo el plan de vuelo, capturando imágenes térmicas y RGB automáticamente, según el enfoque de las cámaras.
- El vuelo se realizó siempre al medio día, entre las 11:00 horas y las 13:00 horas, cuando el sol incida directamente, de manera perpendicular en el cultivo, que es cuando la temperatura diaria alcanza su máxima expresión y el cultivo transpira al máximo, es decir, los estomas de las hojas de abren por completo.
- Importante, se realizará vuelos para ninguna investigación de esta naturaleza cuando el cielo esté completamente nublado, ya que el sol no incidirá en el cultivo de manera directa; tampoco cuando corrientes esté venteando o haya presencia de gallinazos, gavilanes u otras aves cerca al terreno. El viento hará que el VANT pierda equilibrio y las imágenes salgan distorsionadas, las aves por otra parte golpearán contra el quipo, pudiendo derribarlo, ocasionando daños en este.

Lectura de humedad del suelo:

- Previo a realizar esta acción, se instaló el sensor de medición de tensión del suelo Watermark en ambos campos, lecturas que se calibraran con mediciones de humedad del suelo colectadas con el equipo TDR y muestreos de suelo para estimación de la humedad volumétrica.
- Las lecturas de humedad del suelo se realizaron con el TDR, a una profundidad de 20 cm, siendo esta una profundidad media de la raíz del cultivo y en la cual la pérdida de humedad del suelo por evaporación es mínima o casi nula.
- Se tomaron lecturas de humedad solamente en la parcela de arroz con tratamiento riego por goteo, ya que las que están regadas por inundación estuvieron siempre en saturación o sobresaturación.
- Las lecturas se realizaron en el centro de gravedad de cada bloque de arroz, con seis lecturas por cada uno, media hora antes o inmediatamente después del vuelo del VANT.
- En la primera etapa de levantamiento de información solamente se realizaron mediciones de humedad del suelo en los bloques 1, 2, 3 y 4 de la

parcela regada por goteo, debido a que el cultivo en los demás bloques no estaba bien desarrollado.

- En la segunda etapa de levantamiento de información se realizaron lecturas de humedad en todos los bloques regados por goteo.

La humedad que arrojaba el TDR se tuvo que corregir mediante la ecuación $Y = 0.2486X + 8.291$, producto de relacionarla con la humedad real volumétrica del suelo (obtenida con el Watermark), según se grafica en la figura 4.

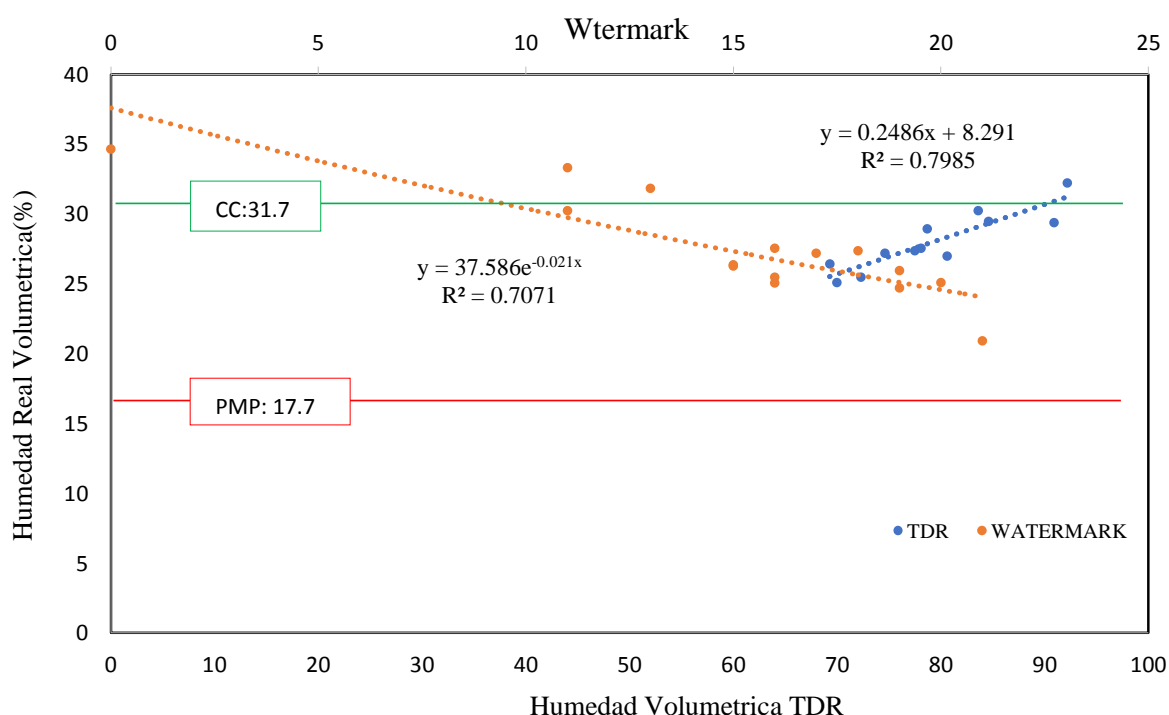


Figura 4. Relación entre humedad volumétrica real y aparente, en la que también se muestra los valores de CC y PMP.

Fuente: Elaboración propia en conjunto con otros investigadores a partir de información colectada en campo.

- Juntamente con las lecturas de humedad se realizaron lecturas de temperatura foliar en el mismo lugar, utilizando el termómetro laser manual, con la finalidad de corregir la temperatura obtenida de las imágenes térmicas.

Procesamiento de imágenes térmicas:

- El ramillete de imágenes térmicas y RGB obtenidas del VANT se procesaron en el software pix4D, mediante el cual unieron y obtuvo una sola imagen por día, tanto de imagen térmica como de imagen RGB, imágenes que fueron captadas por las cámaras Flir y Sony Alfa respectivamente.
- Para obtener solamente una imagen térmica del área foliar del cultivo de arroz, se superpusieron las imágenes térmica y RGB con la ayuda del software ArcGIS, quedando esta última encima de la primera. Luego se realizó una clasificación supervisada en la imagen RGB, quedando esta únicamente con la cobertura vegetal, la cual sirvió como plantilla para que se recorte lo mismo en la imagen térmica.
- Se extrajo la temperatura foliar del cultivo de arroz de cada pixel de la imagen térmica en el software ArcGIS.
- La temperatura obtenida de la imagen térmica es una información cruda, por lo que se corrigió en el software ArcGIS, según el manual de la cámara Flir, mediante el uso de la fórmula $T^{\circ} (^{\circ}\text{C}) = [T^{\circ} (\text{imagen térmica}) \times 0.04] - 273.15$
- La temperatura corregida de la imagen térmica difería de la temperatura obtenida directamente con el termómetro laser manual, ya que la primera había sido obtenida a una altura de 20 metros, por lo que se tuvo que realizar una segunda corrección de temperatura térmica, mediante la fórmula $T^{\circ} \text{ foliar } (^{\circ}\text{C}) = T^{\circ} (^{\circ}\text{C}) \times 0.8046$, en el cual 0.8046 es un coeficiente obtenido de la media de la división de todos los datos de temperatura obtenidos con el termómetro laser entre todos los datos de temperatura obtenidos con la cámara térmica del VANT.

Determinación del índice de estrés hídrico foliar (CWSI):

En total se recolectaron 264 datos puntuales de temperatura foliar mediante termómetro laser manual y humedad del suelo mediante TDR, en los siete días en los que se realizó la toma de imágenes térmicas. En el software ArcGis se identificaron los puntos exactos en donde se habían tomado dichos datos, con la finalidad de extraer la temperatura foliar de la imagen térmica para cada punto.

Se realizó un filtrado en el que se eliminaron el 33.3% de datos anormales o que estaban fuera de los rangos de las temperaturas umbrales (selección estadística realizada por Drurand (2018).

Después del filtrado de y corrección de la información, se obtuvieron 175 datos de CWSI mediante la ecuación desarrollada por Jones (2004):

$$CWSI = \frac{(T_{foliar} - T_{húmeda})}{(T_{seca} - T_{húmeda})}$$

En donde los datos de temperatura húmeda y seca se obtuvieron de la estación experimental Vista Florida. Estos datos obtenidos serían una muestra estadística de lo que se comporta el cultivo de arroz en toda el área cultivada ya que los datos tomados fueron del centro de gravedad de cada bloque regado por goteo.

Por otro lado, en el software ArcGIS conteniendo la imagen térmica, se ingresaron los datos de temperatura húmeda y temperatura seca mediante la ecuación de Jones, obteniendo el CWSI para toda el área foliar del terreno experimental, teniendo como resultado un mapa radiográfico de este.

Con la información ya clasificada se correlacionaron 175 datos de CWSI vs 175 datos de humedad volumétrica del suelo, obteniendo un coeficiente de correlación de Pearson y una ecuación en la que ingresando datos de temperatura foliar se pueda estimar la humedad actual del suelo y así poder programar un riego eficiente para este cultivo. Con la ecuación obtenida entre estas dos variables se obtuvieron mapas de distribución de humedad del suelo, acción realizada en el software ArcGis.

En la figura 5 se muestra la secuencia seguida en procesamiento de la información, desde la captura de imágenes térmicas y lectura de humedad hasta obtener mapas de temperatura del cultivo, mapas de CWSI y mapas de humedad volumétrica del suelo.

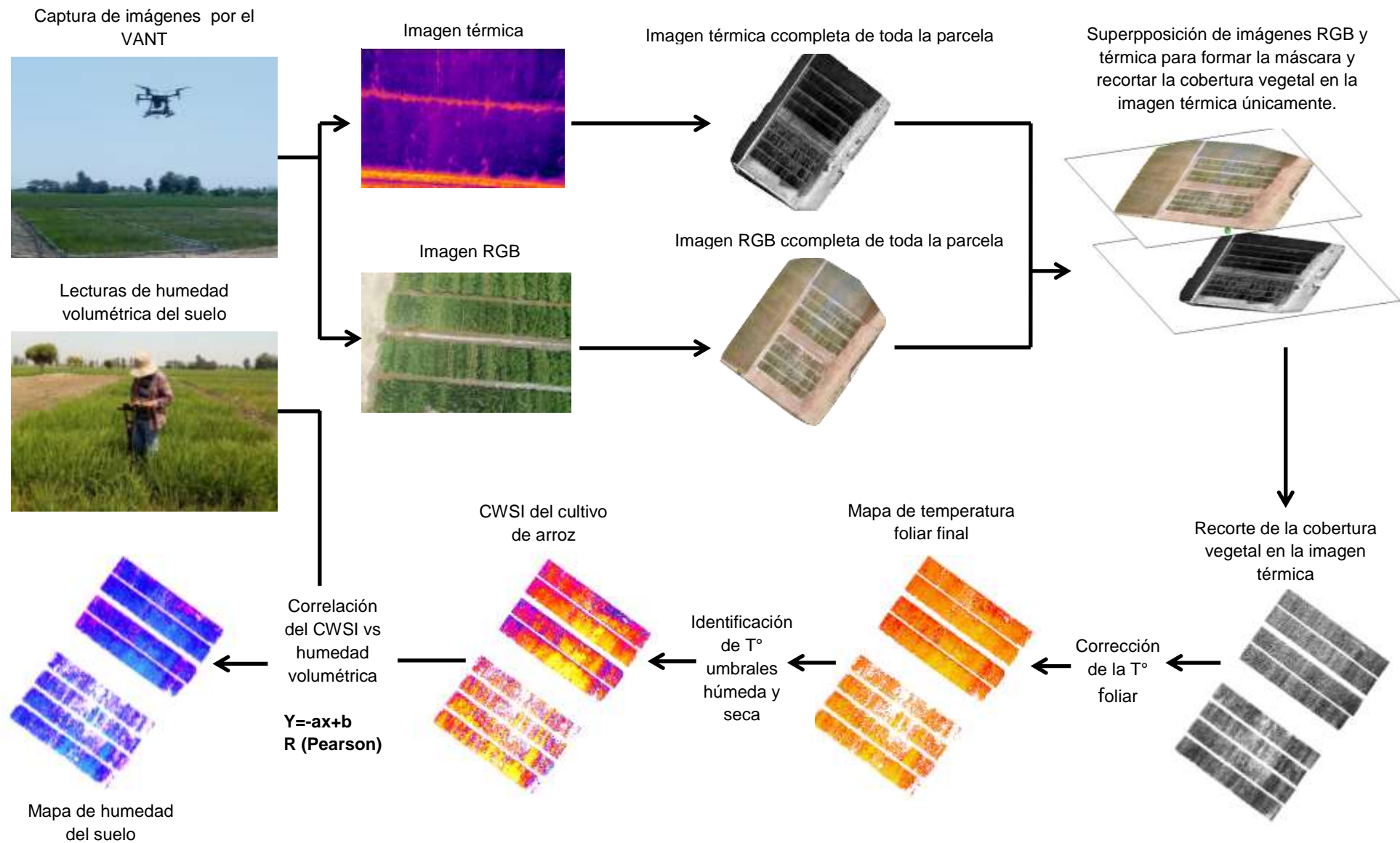


Figura 5. Esquema del procedimiento desarrollado en gabinete en esta investigación.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. UMBRALES DE TEMPERATURA

Se obtuvo la temperatura húmeda del cultivo entre las 07:00 horas y las 08:00 horas, cuando este termina la fase de adormecimiento nocturno e inicia la fase de la fotosíntesis (ver figura 6). Por otro la temperatura seca o de máximo estrés hídrico se tomó a las 13:00 horas, cuando la temperatura del aire alcanza su máxima expresión.

Tabla 4. Horas representativas para estimar las temperaturas húmeda y seca del aire.

| Fase fenológica | Hora de Temperatura húmeda | Hora de Temperatura seca |
|-----------------|----------------------------|--------------------------|
| Vegetativa | 07:00 - 08:00 | 13.00 |
| Reproductiva | 07:00 - 08:00 | 13.00 |
| Maduración | 07:00 - 08:00 | 13.00 |

Fuente: Elaboración propia.

En base a la tabla 4, se recurrió a la data meteorológica de la estación meteorológica automática ubicada en la estación experimental Vista Florida, del INIA, de la cual se obtuvo el registro de temperatura del aire para los días en que se realizaron la colecta de datos en campo, obteniendo así las temperaturas umbrales húmeda y seca para los días 20, 21 y 22 de marzo, así como también para los días 06, 07, 08, y 09 de mayo.

Tabla 5. Temperaturas húmeda y seca, según la fase fenológica, de cada día de toma de datos en campo.

| Día | Fase fenológica | Estado vegetativo | T° húmeda (°C) | T° Seca (°C) |
|-------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------|
| 20 de marzo | Vegetativa | Macollamiento | 22.0 | 30.7 |
| 21 de marzo | Vegetativa | Macollamiento | 21.0 | 30.5 |
| 22 de marzo | Vegetativa | Macollamiento | 21.0 | 31.5 |
| 06 de mayo | Reproductiva y maduración | Floración y grano lechoso | 21.0 | 29.8 |
| | Reproductiva y maduración | Floración y grano lechoso | 22.0 | 27.2 |
| 07 de mayo | Reproductiva y maduración | Floración y grano lechoso | 20.0 | 29.8 |
| 08 de mayo | Reproductiva y maduración | Floración y grano lechoso | 21.0 | 28.4 |
| 09 de mayo | Reproductiva y maduración | Floración y grano lechoso | | |

Fuente: Elaboración propia.

La temperatura húmeda en los días que se realizó la colecta de datos se mantuvo por encima de los 20°C y por debajo de los 22°C, pero, se nota una diferencia significativa en cuanto a la diferencia de las temperaturas seca y la temperatura húmeda de los meses de mayo y marzo. Esto se debe a que la temperatura del ambiente empieza a descender, motivos que causarán una ligera variación en los resultados del CWSI comparados entre las dos etapas de toma de datos.

En la figura 6 se grafica el comportamiento de la temperatura del aire para las dos fases fenológicas del cultivo en las que se recolectaron datos de temperatura foliar y humedad volumétrica, siendo a las 13 horas el momento de mayor requerimiento hídrico.

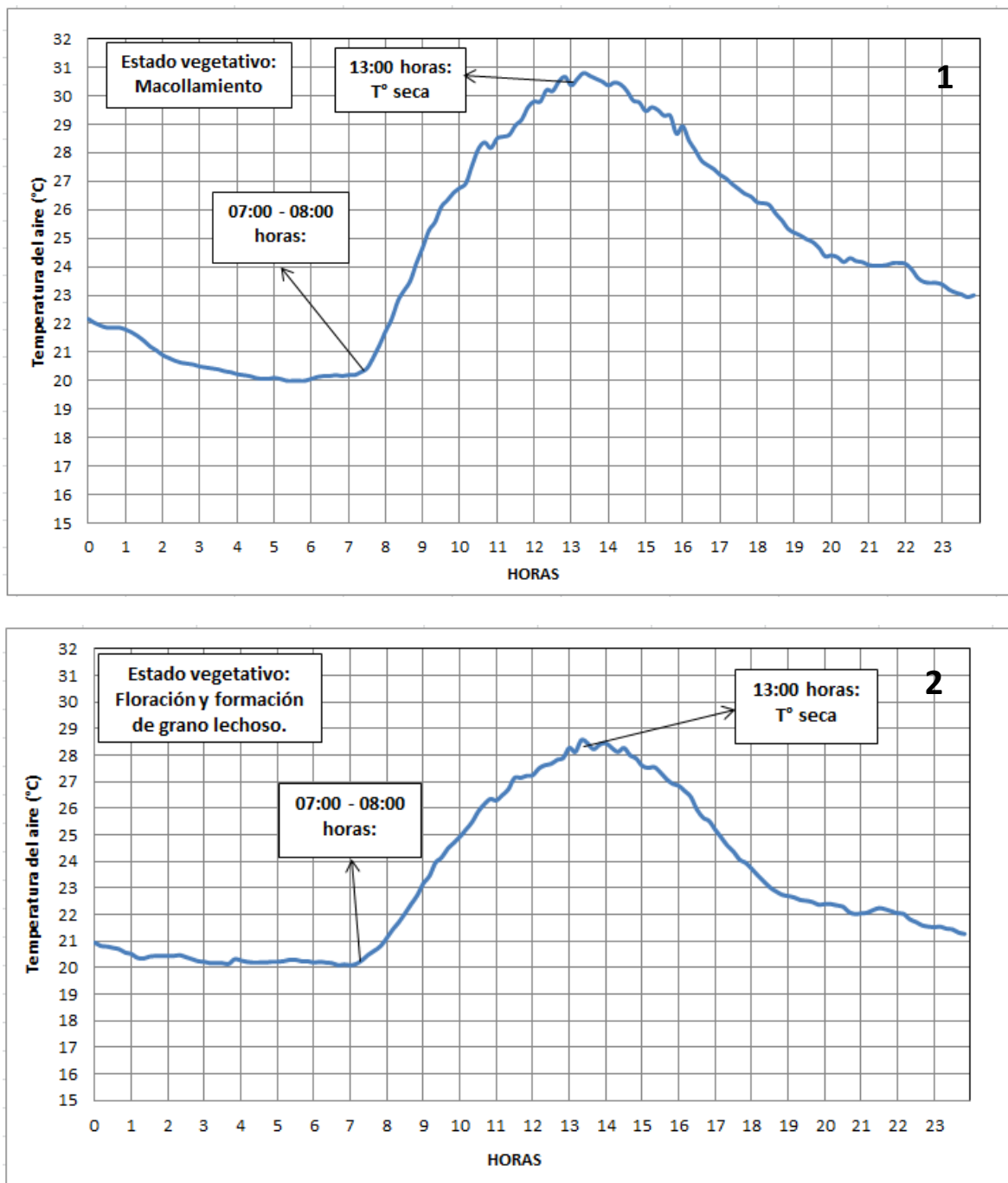


Figura 6. Comportamiento promedio horario de la temperatura del aire (1) en el estado vegetativo de macollamiento (panel superior) y (2) en el estado vegetativo de floración y formación de grano lechoso (panel inferior).

Fuente: Elaboración propia.

4.2. CWSI A PARTIR DE LA TEMPERATURA FOLIAR

El CWSI se determinó con los datos recolectados los días 20, 21 y 22 de marzo, correspondientes al estado vegetativo de macollamiento, asimismo de los días 06, 07, 08 y 09 de mayo, cuando el cultivo estaba en floración y en formación de gano lechoso.

Los pixeles contienen el valor de la temperatura, pero, por error en la toma de datos o por confusión de pixeles del color del suelo con el del cultivo, se obtuvo temperaturas por encima de la temperatura umbral seca, por lo que se tuvo que hacer una corrección, eliminándose las temperaturas superiores para garantizar la selección únicamente de pixeles de temperatura foliar. Así pues, los 264 datos recolectados en los 07 días de levantamiento de información fueron filtrados y se descartaron el 33.3%, quedando 175 datos corregidos y fiables.

Finalmente, en el software ArcGis se ingresó a la ecuación de Jones los datos de temperaturas umbrales, obteniendo así un mapa de CWSI para cada día.

En las figuras 7, 8 y 9 se muestran los mapas de CWSI similar a una radiografía del cultivo para la parcela regada por goteo, cuyos valores de CWSI oscilan desde los 0.0 hasta más de 1.0. Esto facilita el diagnosticar a la parcela en qué parte está faltando el agua, que es el objetivo final de esta investigación. Asimismo, muestra valores muy altos de color azulino, debido a que en esta zona el cultivo estaba amarillento, con poca cobertura vegetal. Por otro lado, el color amarillento del suelo fue confundido con el color amarillento de las hojas al momento de realizar la clasificación supervisada en el ArcGis, esto debido a que se tendría que mejorar la resolución de pixeles y entrenar un programa mediante redes neuronales para que pueda identificar exclusivamente al cultivo de arroz.



Figura 7. Mapa del CWSI del cultivo de arroz, para los días 20,21 y 22 de marzo respectivamente, de la parcela regada por goteo.

Fuente: Elaboración propia en el software ArcGis.

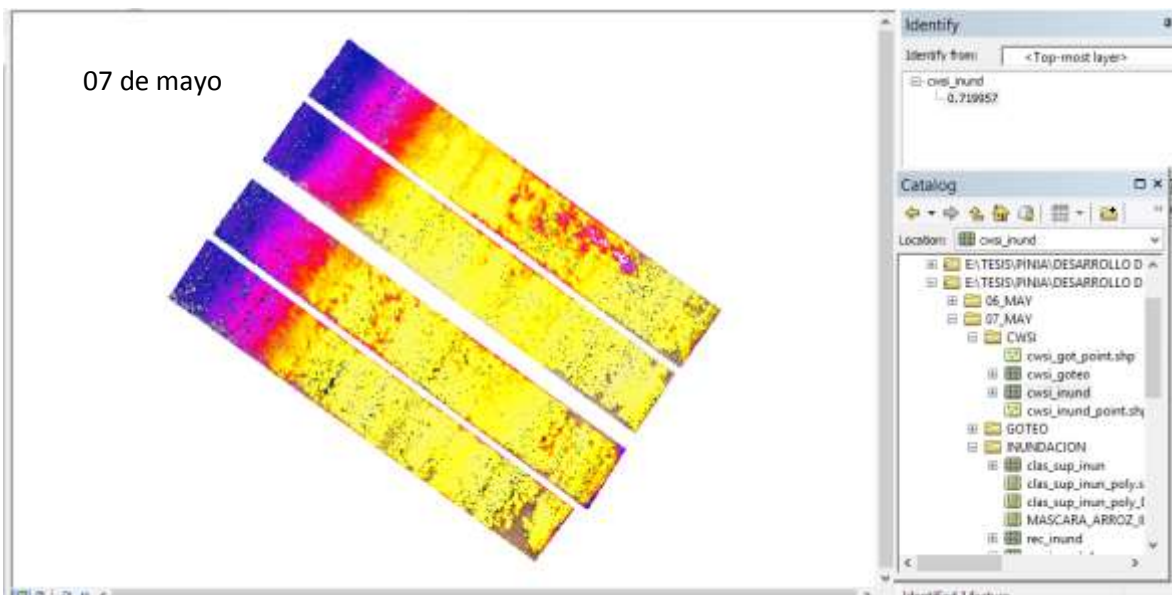
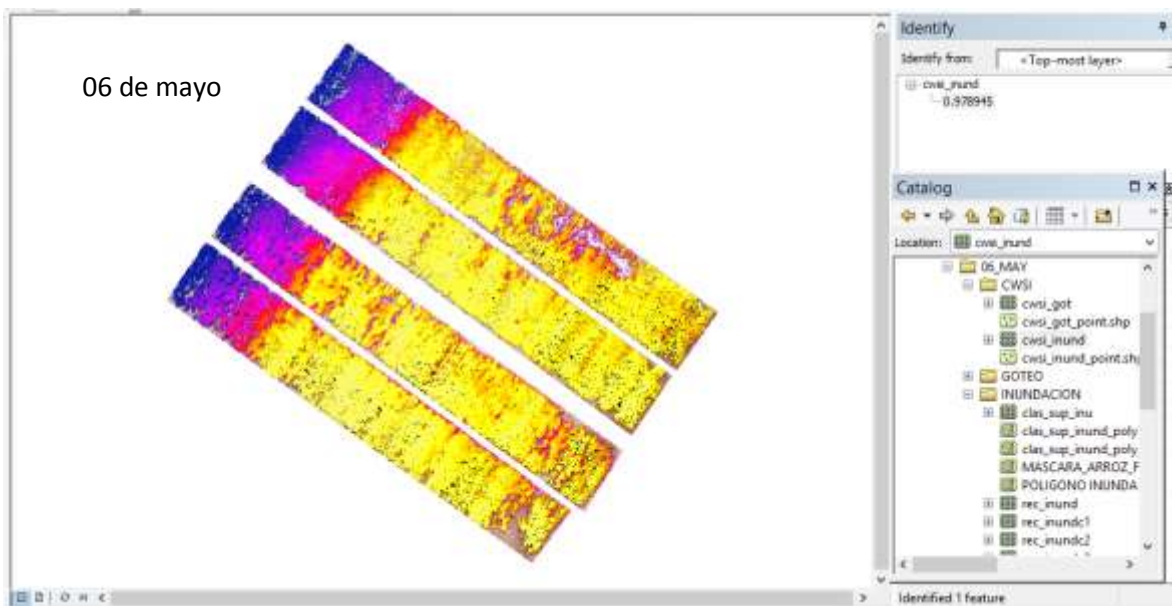


Figura 8. Mapa del CWSI del cultivo de arroz, para los días 06 y 07 de mayo respectivamente, de la parcela regada por goteo.

Fuente: Elaboración propia en el software ArcGis.

La diferencia entre la figura 7 y 8 se debe a que en la primera el cultivo se encontraba en pleno crecimiento, con una cobertura vegetal más pequeña que en la segunda, pues en esta última ya se encontraba entrando a la maduración.

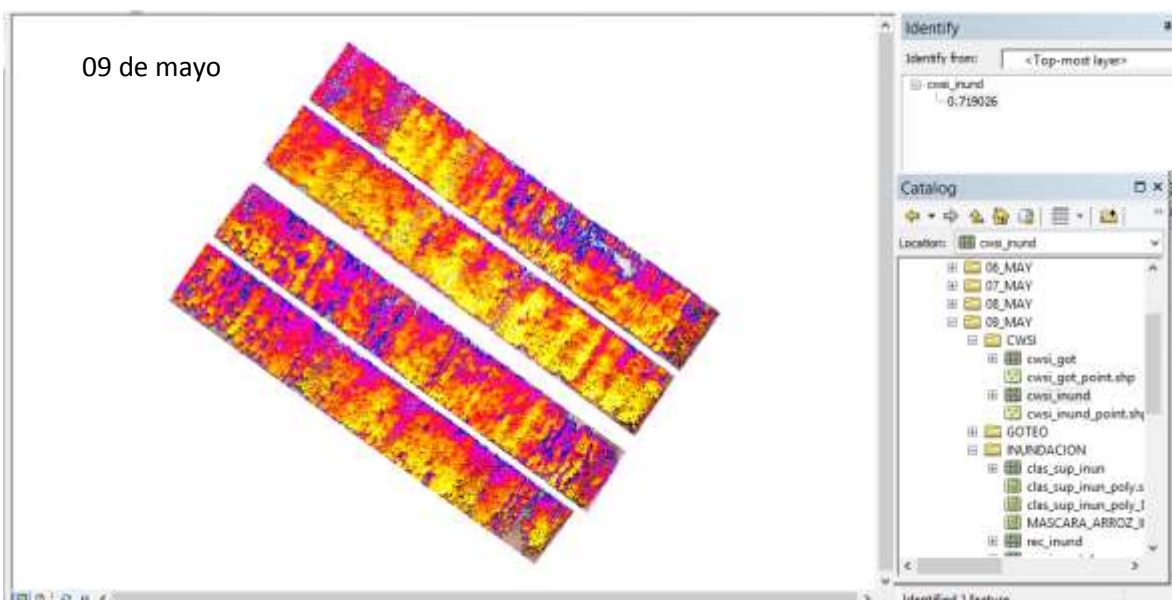
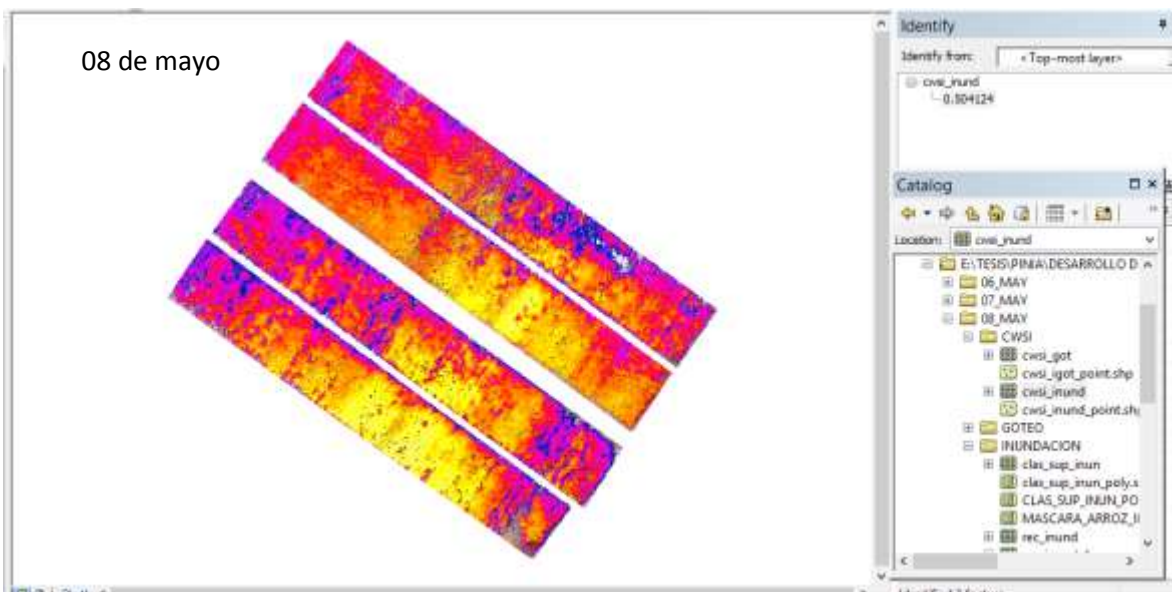


Figura 9. Mapa del CWSI del cultivo de arroz, para los días 08 y 09 de mayo respectivamente, de la parcela regada por goteo.

Fuente: Elaboración propia en el software ArcGis.

La diferencia entre la figura 8 y 9 nos lleva a la interpretación que el cultivo de arroz muestra sensibilidad a las variaciones de humedad aun estando a capacidad de campo, esto quiere decir que si por un día que no se encuentre con mucha humedad, el cultivo entrará en estrés hídrico foliar y cuando lo rieguen nuevamente, su recuperación puede esperar otro día más. Se interpreta de esta forma ya que el día 07 de mayo se regó la parcela.

El CWSI en estas imágenes se aprecia por el color, yendo desde 0.0 que es el color amarillo hasta 1.0 e incluso más en el color azul, mostrando estrés hídrico para el área cultivada que presenta este último color.

Otro factor de la discrepancia entre la fase fenológica vegetativa y la fase reproductiva se debió a que en la primera el cultivo no había desarrollado la suficiente área foliar como para cubrir todo el suelo, confundiéndose algunos pixeles correspondientes al color de la hoja con otros que correspondían a pequeñas algas que afloraban bajo el cultivo debido a que este no estaba inundado. En cambio en la segunda fase, algunas plantas ya estaban en fase de maduración y por ende las hojas estaban en proceso de amarillamiento, por lo que en la clasificación supervisada el programa confundía algunos pixeles de suelo con unos de follaje amarillento, ya que tenían el mismo color, arrojando datos de temperatura por encima de los 40°C.

4.3. RELACIÓN DEL CWSI Y LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA DEL SUELO

Con los datos puntales de humedad volumétrica del suelo, se determinaron los límites de humedad de suelo, siendo de 17.7 % 31.7% para punto de marchitez permanente y capacidad de campo respectivamente (ver figura 4). Luego, se correlacionó el CWSI vs la humedad volumétrica por cada fase fenológica.

La figura 10 muestra la correlación entre estas dos variables, con un coeficiente de correlación lineal inverso $R = -0.266$. El número de datos empleados en esta grafica son inferiores a los de la figura 11, ya que en la primera etapa de colecta de datos solamente se obtuvo información de 04 bloques del tratamiento por goteo.

También hay que recalcar que los bloques son repeticiones, es decir que son iguales en tamaño, tienen la misma densidad de siembra y recibieron el mismo tratamiento.

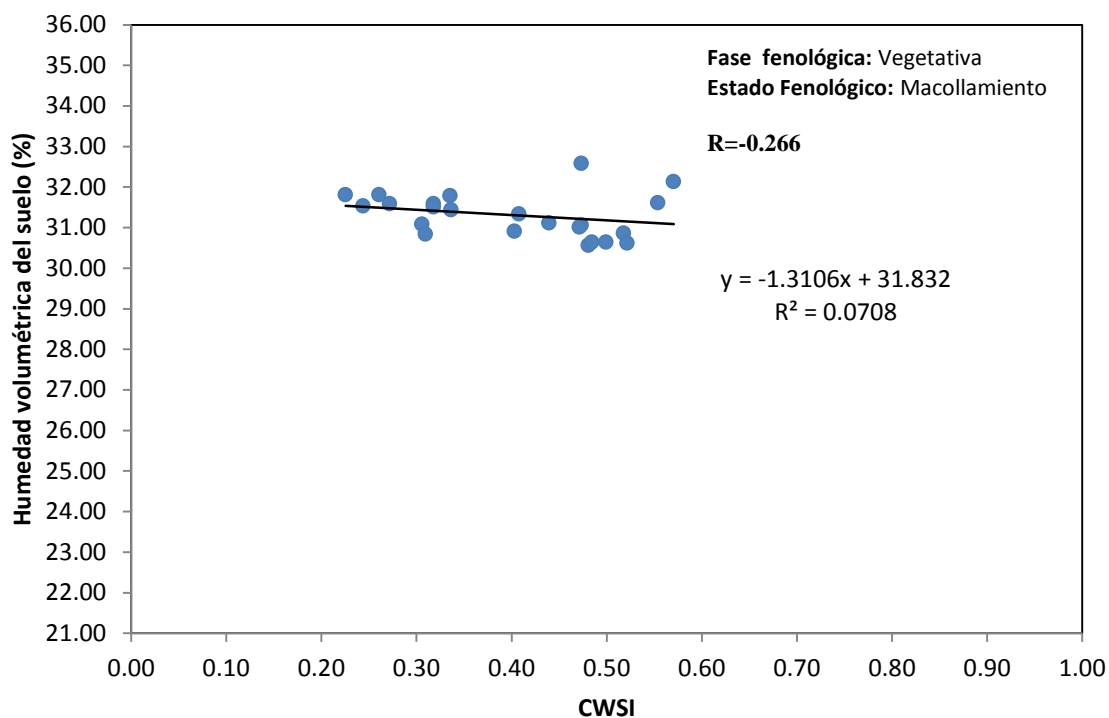


Figura 10. Correlación lineal entre el CWSI y la humedad volumétrica del suelo para los bloques en tratamiento por goteo en la primera fase de colecta de datos.

Fuente: Elaboración propia.

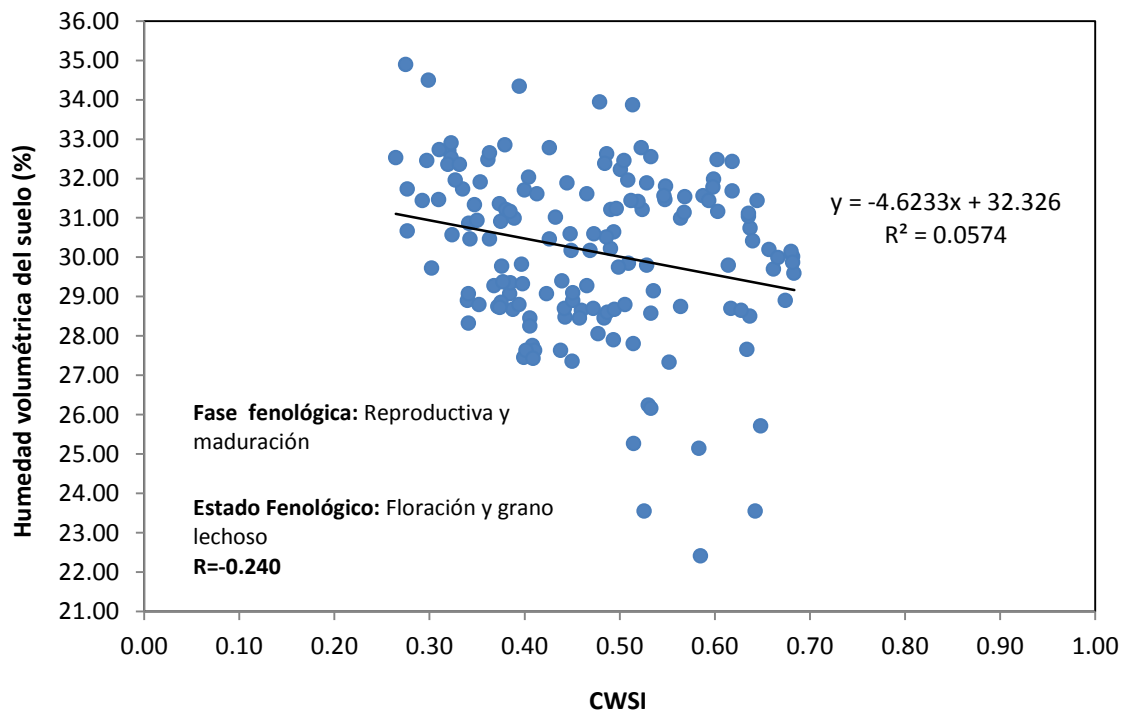


Figura 11. Correlación lineal entre el CWSI y la humedad volumétrica del suelo para los bloques en tratamiento por goteo en la segunda fase de colecta de datos.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 11 muestra más datos porque a diferencia de la figura 10, en este caso fueron 04 días de colecta de información y con todos los bloques del tratamiento por goteo. Se puede apreciar también que $R = -0.240$, es más bajo que en la fase vegetativa, debido a que en esta última fase el cultivo se encontraba en reproducción y maduración, mostrando un color amarillento en gran parte de las hojas.

Finalmente la figura 12 brinda un panorama más completo y amplio de la correlación lineal entre las variables estudiadas en esta investigación, al juntar todos los datos obtenidos en campo, después de un proceso de selección y filtrado de información.

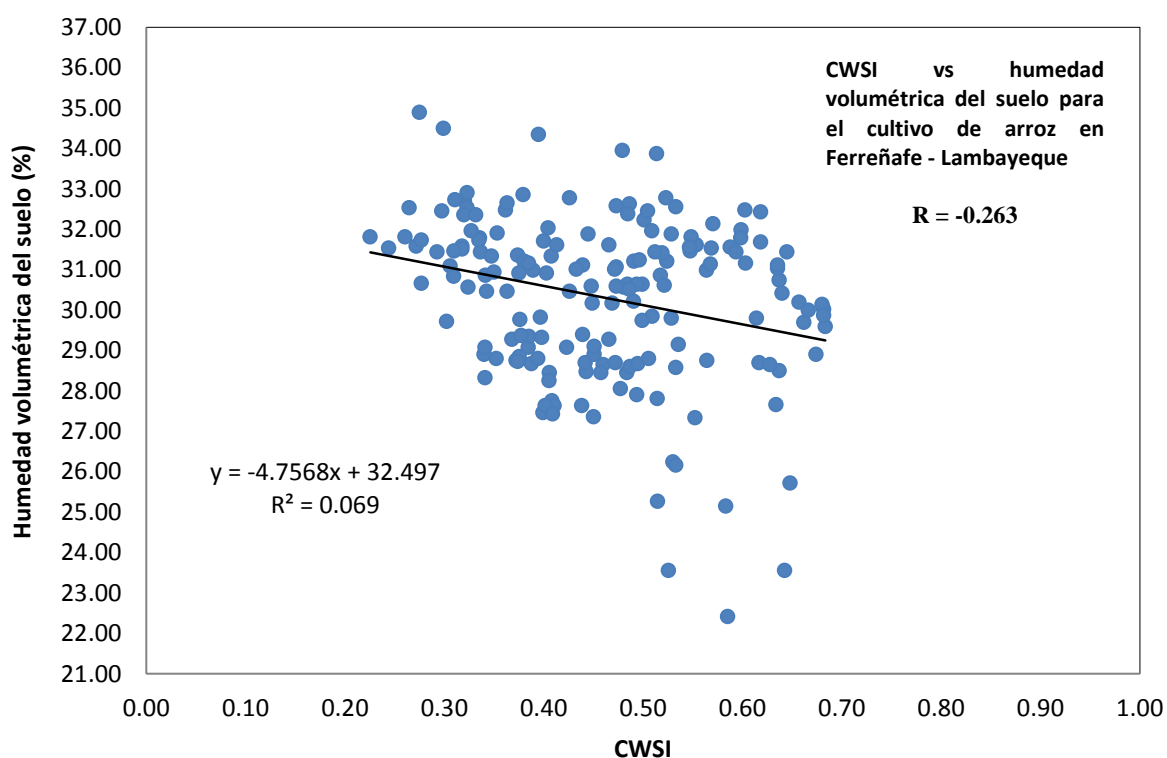


Figura 12. Correlación lineal entre el CWSI y la humedad volumétrica del suelo para el cultivo de arroz en Ferreñafe, Lambayeque.

Fuente: Elaboración propia.

La correlación lineal inversa entre el CWSI (variable independiente) y la humedad volumétrica del suelo (variable dependiente) a una profundidad media de 20 cm fue inversa y dio como resultado final un coeficiente de correlación de Pearson $R = -0.263$, el cual fue sometido a la prueba de estadístico "T" (ver anexo

5) para un nivel de significancia 0.05 y un nivel de confianza del 95%, obteniendo como resultado que “T” > al valor crítico, confirmando la relación entre las dos variables.

La ecuación lineal resultante de este trabajo es $y = -4.7568x + 32.497$, en donde “y” es la humedad del suelo y “x” el CWSI [$CWSI = (T^{\circ} \text{foliar} - T^{\circ} \text{húmeda}) / (T^{\circ} \text{seca} - T^{\circ} \text{húmeda})$]; y se puede utilizar como referencia para realizar otros estudios similares de investigación o para la programación de riego en pequeñas parcelas de arroz en la región. Se recalca que la T° foliar se obtiene de las imágenes térmicas captadas por el VANT y las temperaturas umbrales húmeda y seca se obtienen entre las 07:00 - 8:00 horas y a las 13:00 horas respectivamente, de la estación meteorológica más cercana.

Cuando CWSI es igual a 1, la humedad volumétrica del suelo será igual a 27.74%, pero por cuestiones de prevención, esta no puede disminuir de 28%, ya que el cultivo estaría entrando en déficit hídrico, lo cual indica que el cultivo de arroz entra a estrés hídrico aun estando en capacidad de campo, confirmando lo mostrado en la figura 8. Para que el CWSI sea igual a 0, es decir cuando el cultivo está en sus óptimas condiciones, el suelo tiene que tener una humedad del 32%, es decir, al límite superior de la capacidad de campo (31.7%), comprobando que no es necesario saturar o inundar el suelo con un riego por gravedad para que el cultivo de arroz permanezca sin estrés hídrico, lo cual con un riego por goteo bastaría para cubrir sus necesidades hídricas.

En ambas etapas, las gráficas muestran una correlación inversa, lo cual quiere decir que a menor humedad del suelo mayor es el estrés hídrico, por lo tanto el requerimiento hídrico es mayor.

La profundidad de las lecturas de humedad del suelo corresponde al tamaño medio de las raíces del cultivo, ya que si se tomaban lecturas a menor profundidad, la evapotranspiración influye de manera significativa.

Finalmente se realizó una operación matemática en el software ArcGis, utilizando la ecuación $y = -4.7568x + 32.497$, obteniendo un mapa de humedad del suelo y requerimiento hídrico, según el CWSI del cultivo, generando una zonificación de humedad volumétrica del suelo para de esta manera saber con

precisión en qué lugar de la parcela está haciendo falta el riego, respondiendo así a la pregunta fundamental en la programación de riego, ¿Cuánto regar? y ¿Con qué frecuencia regar? Todo esto gracias a la digitalización de la parcela cultivada que con las imágenes térmicas y la ecuación de humedad volumétrica vs CWSI nos permitió generar estos mapas que se esquematizan en la figura 13 y se muestran en las figuras 14, 15 y 16.

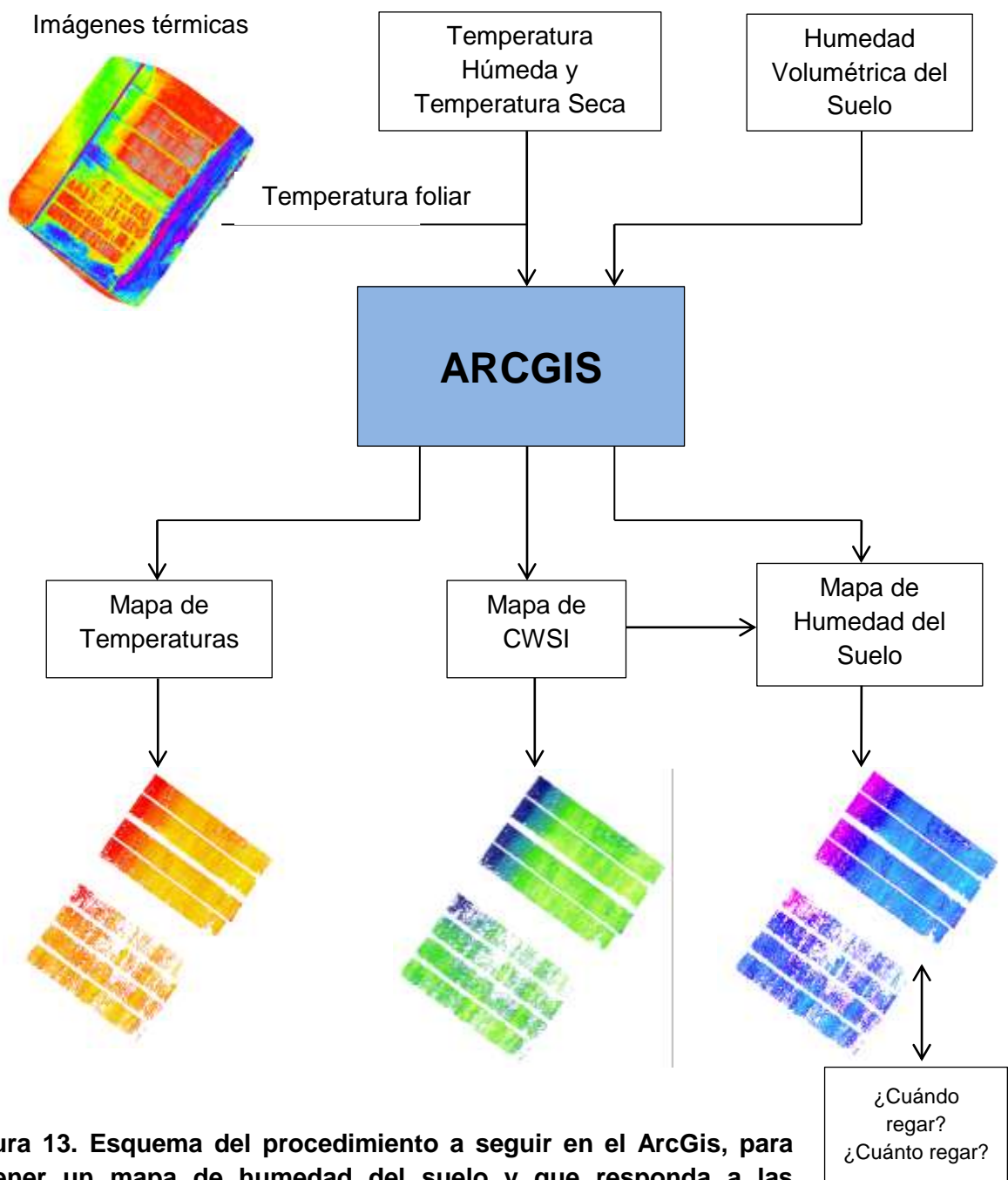


Figura 13. Esquema del procedimiento a seguir en el ArcGis, para obtener un mapa de humedad del suelo y que responda a las preguntas ¿Cuánto y cuando regar?

Fuente: Elaboración propia

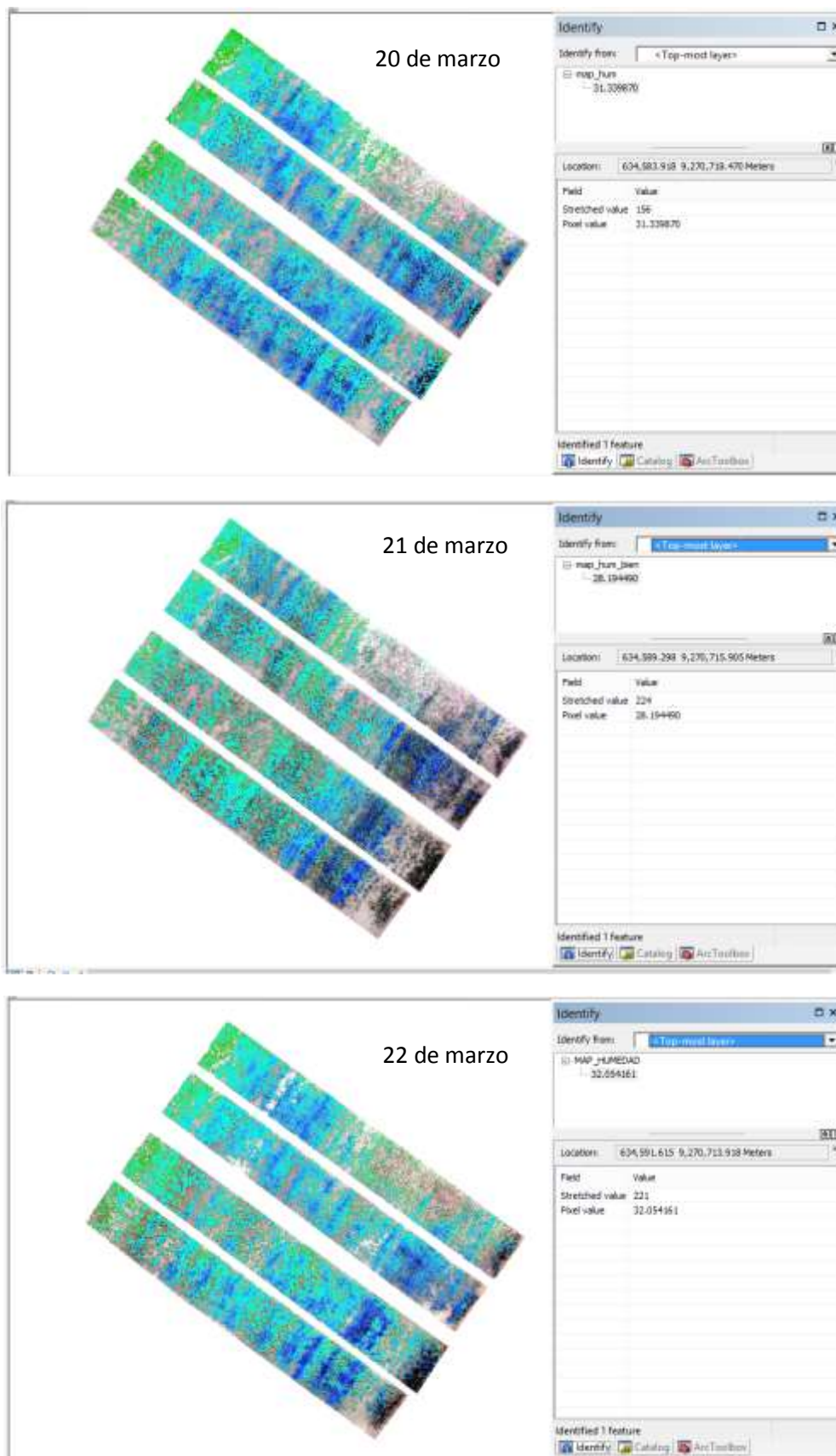


Figura 14. Mapas de humedad del suelo para los días 20. 21 y 22 de marzo, en la fase fenológica vegetativa.

Fuente: Elaboración propia en el software ArcGis.

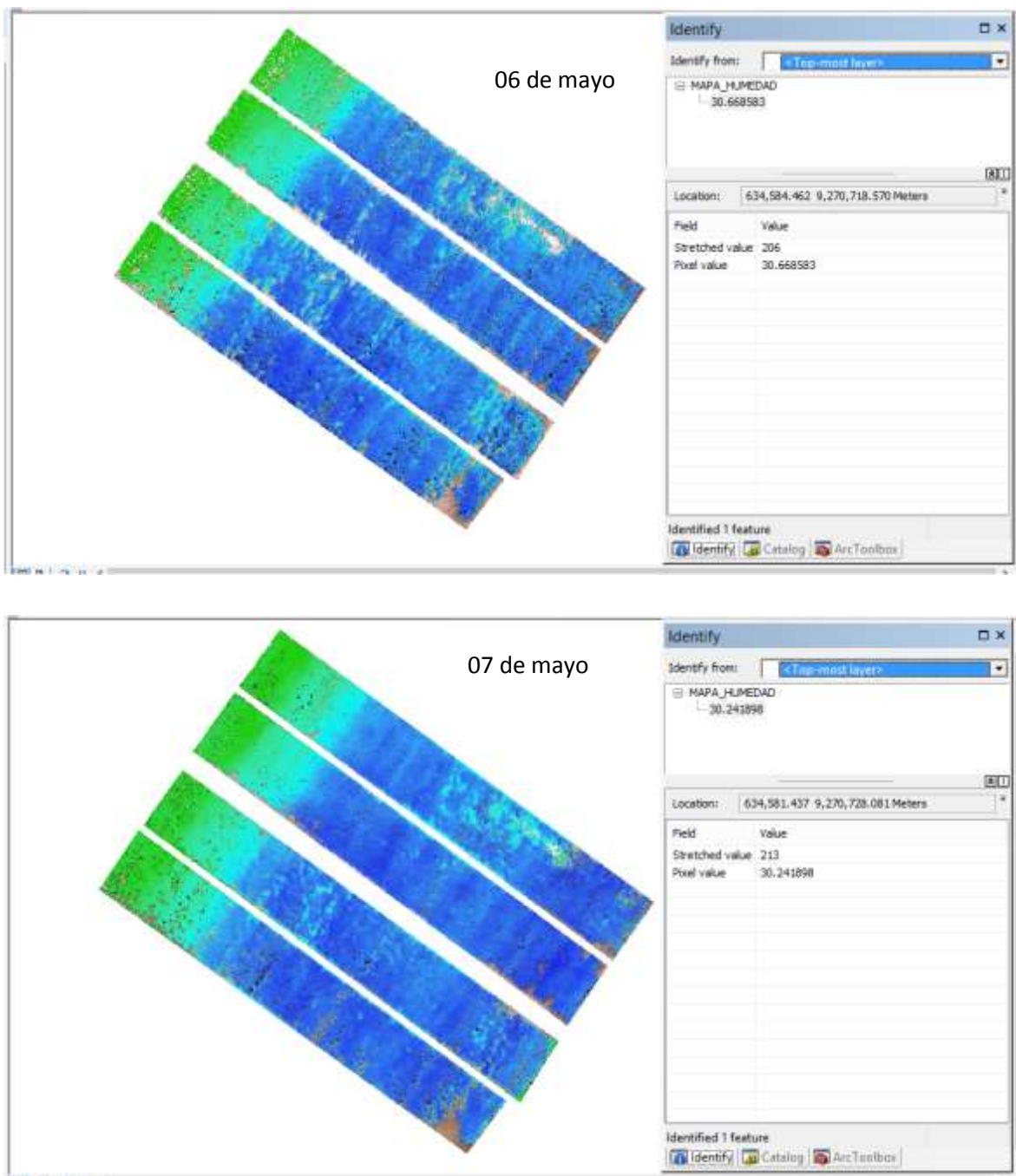


Figura 15. Mapas de humedad del suelo para los días 06 y 07 de mayo, en la fase reproductiva y maduración.

Fuente: Elaboración propia en el software ArcGis.

La humedad del suelo varía desde el color verde que es el más bajo (alrededor del 28%) hasta el color azul intenso que indica un alto contenido de humedad (por encima del 31.7%)

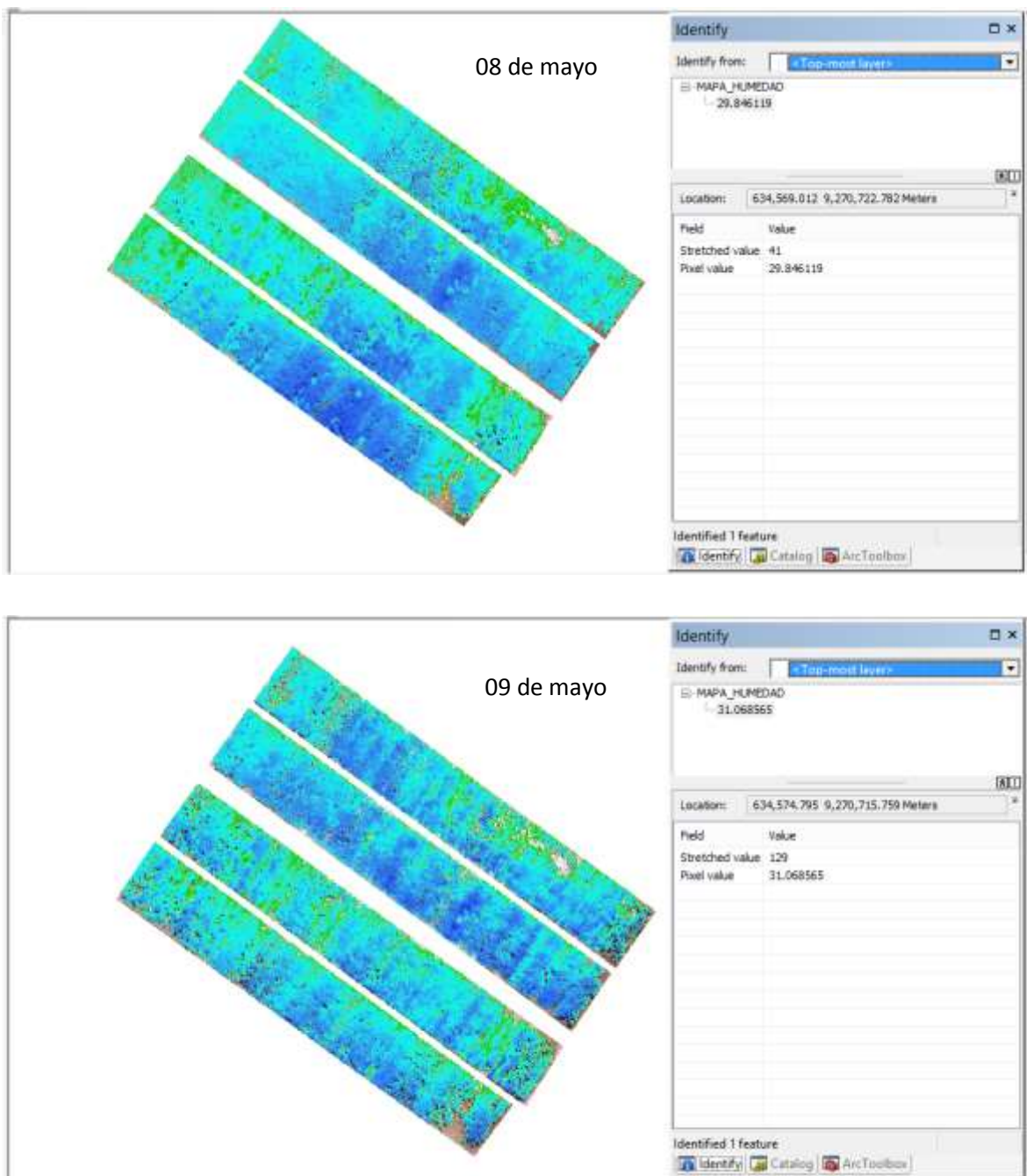


Figura 16. Mapas de humedad del suelo para los días 08 y 09 de mayo, en la fase reproductiva y maduración.

Fuente: Elaboración propia en el software ArcGis.

Para saber qué parte del área cultivada necesita agua se identifica las zonas de color verde o del que se desee programar en el ArcGis. La cantidad de agua a aplicar por los goteros está en función a lo que arroja el programa, teniendo que mantener la humedad del suelo por encima del 28%.

Como parte complementaria a esta investigación, se obtuvieron rendimientos de grano, con máximos de hasta 10.3 t/ha y un mínimo de 5.6 t/ha para el tratamiento realizado por inundación, mientras que el rendimiento del bloque que estuvo sometido a riego por goteo alcanzó un rendimiento máximo de 10.8 t/ha y un rendimiento mínimo de 3.3 t/ha. Asimismo, el agua que se utilizó para producir el arroz sembrado en los dos bloques se resume en la tabla 6. Los datos mostrados en este párrafo y en la siguiente tabla corresponden a otra investigación realizada en conjunto con la presente, en la misma parcela; la discusión y profundización de la misma les compete a los autores pertinentes.

Tabla 6. Agua utilizada en la parcela experimental para producir el cultivo de arroz en los dos bloques, por goteo e inundación.

| Mes | Agua utilizada (m ³)/ha | |
|---------|-------------------------------------|------------------|
| | Riego goteo | Riego inundación |
| Enero | 1,151.01 | 1,747.06 |
| Febrero | 1,445.01 | 3,960.00 |
| Marzo | 1,359.75 | 4,425.88 |
| Abril | 1,665.53 | 2,795.29 |
| Mayo | 1,396.50 | 2,795.29 |
| Junio | 147.06 | 0.00 |
| Total | 7,164.80 | 15,723.53 |

Fuente: Elaboración en base a otros investigadores y al consumo de agua registrado en campo.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

1. La relación entre el CWSI y la humedad volumétrica del suelo a una profundidad de 20 cm tiene como resultado un coeficiente de correlación lineal de Pearson de -0.263, siendo estadísticamente bajo, pero con un nivel de confianza del 95%, para un nivel de significancia o error 0.05, según el estadístico de prueba “T” que se detalla en el anexo 4. La ecuación representativa de toda la investigación que expresa la relación de estas dos variables es $y = -4.7568x + 32.497$, en la que “y” es la humedad volumétrica del suelo (variable dependiente) y “x” es el CWSI (variable independiente).
2. Se obtuvieron las temperaturas umbrales húmeda entre las 07:00 y 08:00 horas y seca a las y a las 13:00 horas respectivamente, para los siete días de levantamiento de datos; oscilando la temperatura húmeda entre los 20°C y 21°C y la temperatura seca entre los 27.2°C y los 31.5°C.
3. Con la estimación del CWSI del cultivo de arroz a través de las imágenes térmicas captadas por un VANT sí se puede determinar la humedad volumétrica del suelo, mediante el empleo de sensores remotos, gracias a la relación lineal inversa que existe entre estas dos variables.

5.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda:

1. Realizar un estudio económico que complemente a la investigación, de manera que permita evaluar y determinar la viabilidad de la implementación de esta metodología empleada en un sistema de riego por goteo.
2. Utilizar una estación meteorológica automática en la parcela estudiada, con la finalidad de que los datos de temperatura del aire sean los más reales al lugar de crecimiento del cultivo.
3. Realizar como mínimo 03 vuelos por etapa vegetativa: macollamiento, primodio floral, estado de huso, floración y grano lechoso. Esto implica que el drone tiene que estar disponible para la investigación, el tiempo que sea necesario, para asegurar obtener un coeficiente de correlación lineal inverso más cercano a -1.
4. Comparar el CWSI obtenido de imágenes térmicas colectadas por un VANT y el CWSI obtenido de imágenes satelitales.
5. Aplicar la misma metodología para realizar investigación en cultivos perennes como árboles frutales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Argentel, L., Garatuza, J., Armendáriz, M., Yépez, E., Arredondo, J. y González, J. (2017). Revisión Bibliográfica: Estrés Térmico del Cultivo de Trigo. Implicaciones Fisiológicas, Bioquímicas y Agronómicas. *Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas de Cuba*. 38(1), 57-67.
- Benitez, A. (2005). *Avances Recientes en Biotecnología Vegetal e Ingeniería Genética de las Plantas*. Barcelona, España: Editorial Reverté S.A.
- Blageas, D. (octubre del 2007). Termografía Infraroja: Una Técnica Multifacética para la Evaluación no Destructiva (END). *IV Conferencia Panamericana de END*, Buenos Aires, Argentina.
- De Santa Otalla, F., Lopez, P. y Calera, A. (2005). *Agua y Agronomía*. Madrid, España: Ediciones Mundi - Prensa.
- Durand, M. (2018). *Caracterización del Índice de Estrés Hídrico del Cultivo de Arroz Mediante el uso de Sensores Térmicos y de Humedad del suelo en La Molina, Lima - Perú*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- González, A., Amarillo, G., Amarillo, M. y Sarmiento, F. (2015). Drones Aplicados a la Agricultura de Precisión. *Revista Especializada en Ingeniería*. 23-37. DOI: 10.22490/25394088.1585.
- Jones, H.G. (2014). *Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*. 3 Ed. Cambridge University Press., UK. 428 p.
- Jones, HG. (2004). Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology. *Advances in Botanical Research*. 41: 108-155.

- López, R., Arteaga, R., Vázquez, M., López, I., Sánchez, I. (2009). Índice de estrés Hídrico como un Indicador del Momento de Riego en Cultivos Agrícolas. *Agricultura Técnica en México*. 35(1), 92-106.
- Moquete, C. (2010). *Guía Técnica El Cultivo de Arroz*. Santo Domingo, República Dominicana: CEDAF.
- Moreno, L. (2008). Respuesta de las Plantas al Estrés Hídrico. Una Revisión. *Universidad Nacional de Colombia*. 27(2), 179-191.
- Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura (2018, Abril). Producción Mundial de Arroz Cáscara. *Seguimiento del Mercado del Arroz de la FAO*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/I9243ES/i9243es.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura (2014, Mayo). El agua: el recurso más básico y a la vez el más indispensable. Recuperado de <http://www.fao.org/zhc/detail-events/es/c/231226/>
- Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C. (2003). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Rajeev, B., Neeraj, S., Soman, P., Sarvan, S., Bhardwaj, A., Pandiaraj, T. and Bhardwaj, R. (2018). On-Farm Drip Irrigation in Rice for Higher Productivity and Profitability in Haryana, India. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 7(2), 506-512.
- Schugurensky, C. y Capraro, F. (2013). Control Automático de Riego Agrícola con Sensores Capacitivos de Humedad de Suelo. Aplicaciones en Vid y Olivo. *ResearchGate*. (p.4). recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/228374116>
- Seek Thermal. ¿Qué es la Tecnología de Imagen Térmica? Recuperado de <https://support.thermal.com/hc/es/articles/207544226--Qu%C3%A9-es-la-tecnolog%C3%ADa-de-imagen-t%C3%A9rmica->

- Servicio Nacional de Meteorología de Hidrología del Perú_ (2019). *Pronóstico del tiempo para Chiclayo (Lambayeque)*. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=lambayeque&p=pronostico-detalle>
- Teresita, D. (2013). *Evaluación del Estrés Hídrico y de los Factores que lo Afectan Usando Información Teledetectada*. (Tesis doctoral). Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.
- Thangjam, C., Brajkishor, P. and AK, B. (2017). Effect of drip irrigation on growth and yield of direct seeded rice (*Oryza sativa* L.). *International Journal of Chemical Studies*. 6(1), 161-164.
- Villar, H. (2019). *Estrés Hídrico del Cultivo de Arroz IR 71706 Vía Termografía Mejorada y Calibrada del Área del Dósel en la UNAL*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

ANEXOS

Anexo 1. Materiales y equipos



Lector de humedad TDR



Puntos de control georeferenciados



Vehículo aéreo no o tripulado o drone



Drone equipado con la cámara
RGB



Watermark



Termómetro infrarrojo



Estación geodésica



Cámara térmica



Sistema de riego por goteo instalado en la parcela experimental

Anexo 2. Evolución del cultivo



Siembra



Emergencia



Plántula



Macollamiento



Primodio floral y estado de uso



Floración



Arroz en grano



Maduración



Vista aérea de la parcela experimental, tomada por la cámara RGB del instalada en el vehículo aéreo no tripulado. 1) Bloque regado por inundación; 2) Bloque regado por goteo.

Anexo 3. Levantamiento de información en campo o lectura de datos



Instalación del sistema de riego por goteo



Extracción de muestras de suelo para determinar la textura, densidad y humedad gravimétrica



Instalación de puntos de control para su posterior georeferenciación



Georeferenciación de los puntos de control con GPS diferencial



Lecturas de humedad del suelo con el TDR



Anotaciones de datos colectados en campo



Programación de la ruta de vuelo del drone y su calibración respectiva antes del despegue.

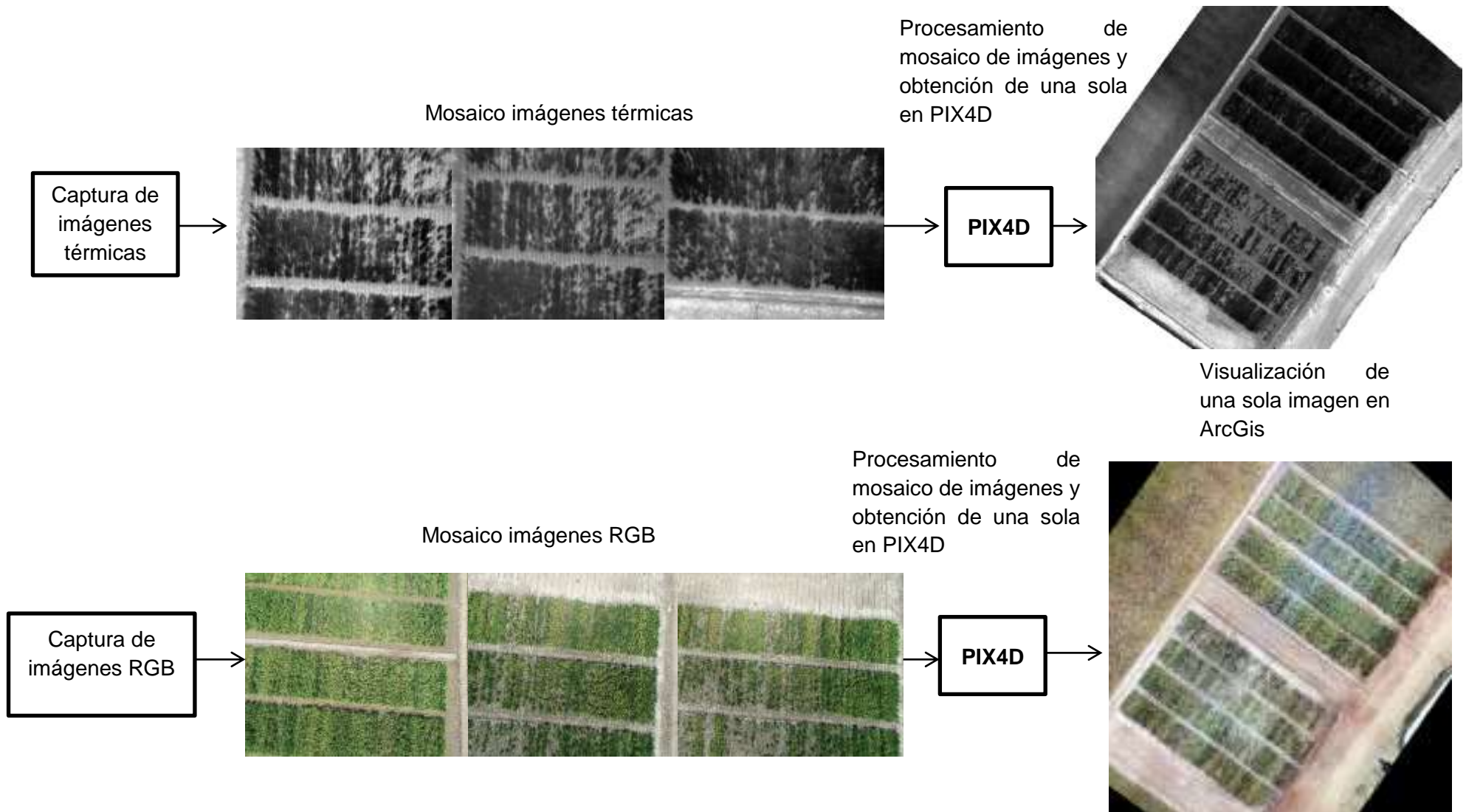


Vuelo del drone equipado con la cámara térmica y RGB en la primera etapa de colecta de datos, en el mes de marzo de 2019



Vuelo del drone equipado con la cámara térmica y RGB en la segunda etapa de colecta de datos, en el mes de mayo de 2019

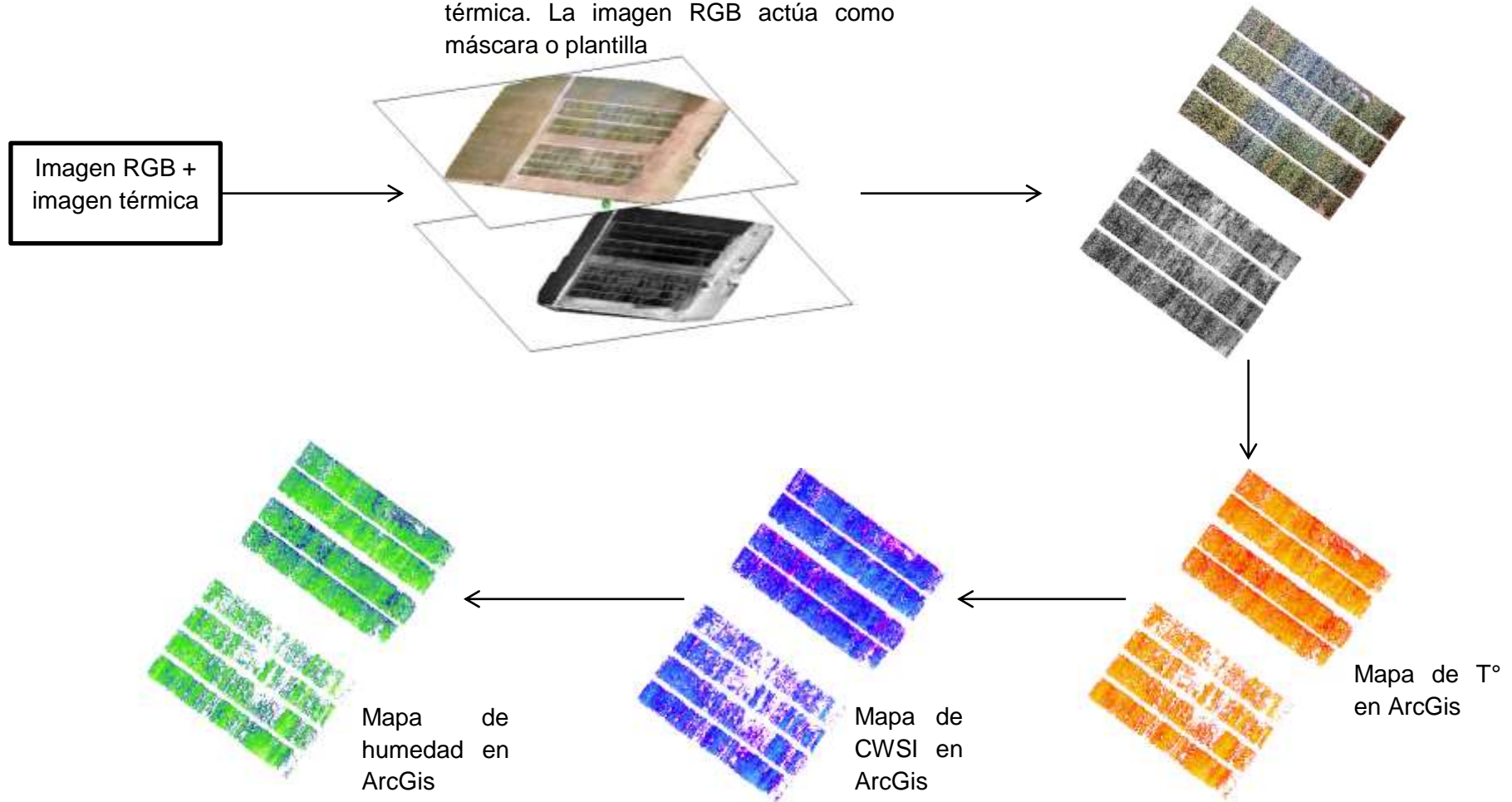
Anexo 4. Procesamiento de imágenes térmicas



Continuación del anexo 4

Superposición de imágenes RGB + térmica en ArcGis, con la finalidad de extraer la cobertura vegetal en la imagen térmica. La imagen RGB actúa como máscara o plantilla

Recorte de cobertura vegetal únicamente en ArcGis



Anexo 5. Estadístico de prueba “T” para aceptar o rechazar la hipótesis nula de la relación lineal entre el CWSI y la humedad volumétrica del suelo, para todos los datos colectados y graficados en la figura 12.

Hipótesis:

H_1 : $P = 0$: No existe una correlación lineal entre el CWSI y la humedad volumétrica del suelo.

H_2 : $P \neq 0$: Si existe una correlación lineal entre el CWSI y la humedad volumétrica del suelo.

Prueba de estadístico “T”

$$T = \frac{R}{\sqrt{\frac{1-R^2}{N-2}}}$$

Si $|T| > \text{Valor crítico}$ -> se rechaza la hipótesis nula H_1 , afirmando que sí existe una correlación lineal entre las dos variables (CWSI y humedad volumétrica del suelo).

Si $|T| < \text{Valor crítico}$ -> se afirma la hipótesis nula H_1 , rechazando una correlación lineal entre las dos variables (CWSI y humedad volumétrica del suelo).

Datos

$R = -0.263$

$N = 175$

Grados de libertad = $N-2 = 173$

Grados de significancia $\alpha = 0.05$

Tabla de distribución "T" de una cola

| g.d.l | área a la derecha de t | | | | | | | | |
|-------|------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | 0,0005 | 0,0025 | 0,005 | 0,0075 | 0,01 | 0,015 | 0,02 | 0,025 | 0,05 |
| 1 | 636,619 | 127,321 | 63,657 | 42,433 | 31,821 | 21,205 | 15,895 | 12,706 | 6,314 |
| 2 | 31,599 | 14,089 | 9,925 | 8,073 | 6,965 | 5,643 | 4,849 | 4,303 | 2,920 |
| 3 | 12,924 | 7,453 | 5,841 | 5,047 | 4,541 | 3,896 | 3,482 | 3,182 | 2,353 |
| 4 | 8,610 | 5,598 | 4,604 | 4,088 | 3,747 | 3,298 | 2,999 | 2,776 | 2,132 |
| 5 | 6,869 | 4,773 | 4,032 | 3,634 | 3,365 | 3,003 | 2,757 | 2,571 | 2,015 |
| ... | | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | | |
| 40 | 3,551 | 2,971 | 2,704 | 2,542 | 2,423 | 2,250 | 2,123 | 2,021 | 1,684 |
| 60 | 3,460 | 2,915 | 2,660 | 2,504 | 2,390 | 2,223 | 2,099 | 2,000 | 1,671 |
| 80 | 3,416 | 2,887 | 2,639 | 2,486 | 2,374 | 2,209 | 2,088 | 1,990 | 1,664 |
| 90 | 3,402 | 2,878 | 2,632 | 2,480 | 2,368 | 2,205 | 2,084 | 1,987 | 1,662 |
| 100 | 3,390 | 2,871 | 2,626 | 2,475 | 2,364 | 2,201 | 2,081 | 1,984 | 1,660 |
| 120 | 3,373 | 2,860 | 2,617 | 2,468 | 2,358 | 2,196 | 2,076 | 1,980 | 1,658 |
| inf. | 3,291 | 2,807 | 2,576 | 2,432 | 2,326 | 2,170 | 2,054 | 1,960 | 1,645 |

Resultados

| | |
|---|-----------|
| Observaciones (N) | 175 |
| Coeficiente de correlación de Pearson (R) | -0.263 |
| Grados de libertad (N-2) | 173 |
| Nivel de significancia (α) | 0.05 |
| Estadístico t | -3.585 |
| Valor crítico de t (dos colas) | +/- 1.960 |

$S |T| > \text{Valor crítico}$

$-3.585 > -1.960$

Por lo tanto se rechaza la hipótesis nula H_1 , afirmando que sí existe una correlación lineal entre las dos variables (CWSI y humedad volumétrica del suelo).

Anexo 6. Datos filtrados de CWSI y humedad volumétrica del suelo, recolectados en campo.

| CWSI | HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) |
|------|-------------------------|
| 0.23 | 31.81 |
| 0.26 | 31.81 |
| 0.32 | 31.58 |
| 0.34 | 31.78 |
| 0.32 | 31.51 |
| 0.41 | 31.34 |
| 0.47 | 31.06 |
| 0.48 | 30.57 |
| 0.50 | 30.64 |
| 0.44 | 31.11 |
| 0.52 | 30.86 |
| 0.27 | 31.58 |
| 0.24 | 31.54 |
| 0.34 | 31.44 |
| 0.31 | 31.09 |
| 0.40 | 30.91 |
| 0.31 | 30.84 |
| 0.48 | 30.64 |
| 0.47 | 31.01 |
| 0.57 | 32.13 |
| 0.55 | 31.61 |
| 0.47 | 32.58 |
| 0.52 | 30.62 |
| 0.53 | 26.24 |
| 0.58 | 25.15 |
| 0.64 | 23.56 |
| 0.65 | 25.72 |
| 0.53 | 28.58 |
| 0.51 | 29.84 |
| 0.53 | 26.17 |

| CWSI | HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) |
|------|-------------------------|
| 0.59 | 22.41 |
| 0.55 | 27.33 |
| 0.48 | 28.05 |
| 0.53 | 23.56 |
| 0.51 | 25.27 |
| 0.49 | 32.63 |
| 0.60 | 31.98 |
| 0.47 | 30.17 |
| 0.49 | 30.64 |
| 0.50 | 32.23 |
| 0.48 | 32.38 |
| 0.52 | 31.21 |
| 0.55 | 31.46 |
| 0.51 | 33.87 |
| 0.53 | 29.79 |
| 0.53 | 32.55 |
| 0.61 | 29.79 |
| 0.64 | 30.74 |
| 0.60 | 31.16 |
| 0.60 | 32.48 |
| 0.56 | 30.99 |
| 0.49 | 31.21 |
| 0.52 | 31.41 |
| 0.52 | 32.78 |
| 0.57 | 31.14 |
| 0.50 | 32.45 |
| 0.53 | 31.88 |
| 0.50 | 31.24 |
| 0.57 | 31.54 |
| 0.55 | 31.81 |

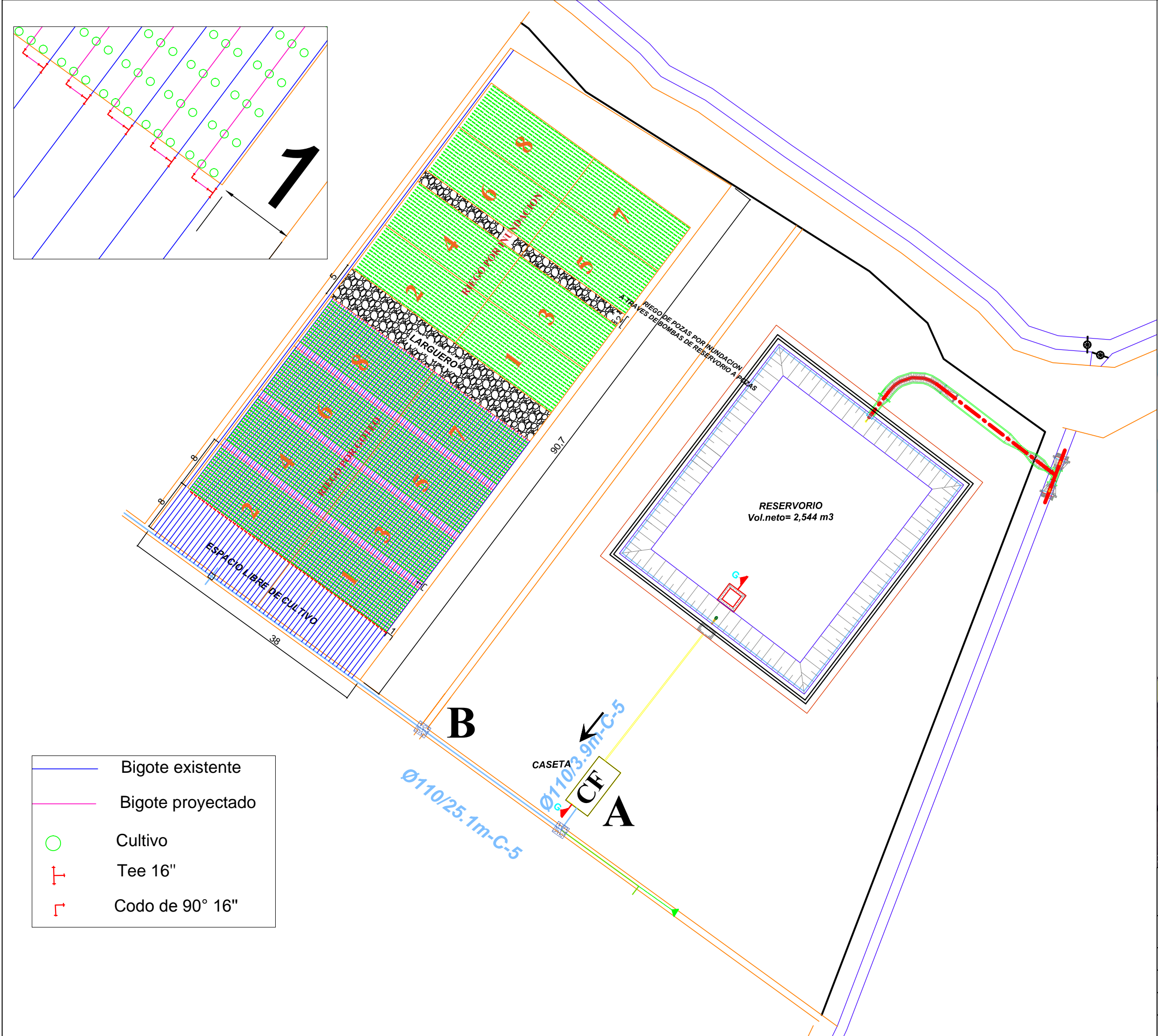
| CWSI | HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) |
|------|-------------------------------|
| 0.59 | 31.56 |
| 0.55 | 31.56 |
| 0.64 | 28.50 |
| 0.62 | 28.70 |
| 0.63 | 27.66 |
| 0.56 | 28.75 |
| 0.48 | 28.45 |
| 0.66 | 30.19 |
| 0.63 | 28.65 |
| 0.68 | 30.02 |
| 0.67 | 28.90 |
| 0.68 | 29.60 |
| 0.48 | 33.95 |
| 0.68 | 30.14 |
| 0.66 | 29.70 |
| 0.59 | 31.44 |
| 0.64 | 31.04 |
| 0.64 | 31.44 |
| 0.60 | 31.78 |
| 0.68 | 29.87 |
| 0.64 | 30.42 |
| 0.67 | 29.99 |
| 0.64 | 31.11 |
| 0.62 | 31.68 |
| 0.62 | 32.43 |
| 0.30 | 29.72 |
| 0.34 | 30.47 |
| 0.34 | 28.90 |
| 0.41 | 27.76 |
| 0.41 | 27.63 |

| CWSI | HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) |
|------|-------------------------------|
| 0.40 | 27.46 |
| 0.40 | 27.63 |
| 0.28 | 30.67 |
| 0.31 | 31.46 |
| 0.30 | 32.45 |
| 0.32 | 32.70 |
| 0.31 | 32.73 |
| 0.28 | 31.73 |
| 0.38 | 29.07 |
| 0.37 | 28.75 |
| 0.47 | 29.27 |
| 0.38 | 28.85 |
| 0.42 | 29.07 |
| 0.26 | 32.53 |
| 0.29 | 31.44 |
| 0.36 | 32.48 |
| 0.35 | 31.34 |
| 0.37 | 31.36 |
| 0.38 | 31.21 |
| 0.44 | 28.48 |
| 0.44 | 28.70 |
| 0.46 | 28.65 |
| 0.54 | 29.15 |
| 0.47 | 31.61 |
| 0.45 | 28.90 |
| 0.34 | 29.07 |
| 0.37 | 29.27 |
| 0.34 | 28.33 |
| 0.41 | 27.43 |
| 0.39 | 28.68 |

| CWSI | HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) |
|------|-------------------------------|
| 0.39 | 29.35 |
| 0.39 | 28.80 |
| 0.41 | 28.45 |
| 0.49 | 30.22 |
| 0.49 | 28.60 |
| 0.47 | 28.70 |
| 0.45 | 29.10 |
| 0.41 | 28.25 |
| 0.37 | 28.73 |
| 0.51 | 27.81 |
| 0.51 | 31.44 |
| 0.49 | 30.52 |
| 0.47 | 30.59 |
| 0.46 | 28.45 |
| 0.49 | 28.68 |
| 0.44 | 27.63 |
| 0.49 | 27.91 |
| 0.51 | 28.80 |
| 0.45 | 27.36 |
| 0.33 | 31.73 |
| 0.38 | 32.85 |
| 0.33 | 31.96 |
| 0.32 | 32.53 |
| 0.32 | 32.90 |
| 0.36 | 32.65 |
| 0.34 | 30.86 |
| 0.32 | 30.57 |
| 0.40 | 29.82 |
| 0.35 | 30.94 |
| 0.40 | 31.71 |

| CWSI | HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) |
|------|-------------------------------|
| 0.41 | 31.61 |
| 0.28 | 34.89 |
| 0.30 | 34.49 |
| 0.39 | 34.34 |
| 0.44 | 31.88 |
| 0.43 | 32.78 |
| 0.51 | 31.96 |
| 0.39 | 30.99 |
| 0.43 | 31.01 |
| 0.45 | 30.59 |
| 0.32 | 32.36 |
| 0.36 | 30.47 |
| 0.38 | 30.91 |
| 0.38 | 29.77 |
| 0.35 | 28.80 |
| 0.38 | 29.37 |
| 0.33 | 32.36 |
| 0.35 | 31.91 |
| 0.40 | 32.03 |
| 0.38 | 31.16 |
| 0.45 | 30.17 |
| 0.44 | 29.40 |
| 0.50 | 29.75 |
| 0.43 | 30.47 |
| 0.40 | 29.32 |

Anexo 7. Plano de la parcela experimental



Tesis:
"ESTIMACIÓN DEL ESTRES HIDRICO DEL CULTIVO DE ARROZ A PARTIR DE
IMAGENES TERMICAS DE UN VANT EN FERREÑAFE, LAMBAYEQUE"

| PLANO DE LA PARCELA EXPERIMENTAL | | | |
|-----------------------------------|--|--|--|
| Autor: Heler Samir Perez Cubas | | | Lámina: < |