

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**



**“EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL AIRE EN LOS ESTADOS
FENOLÓGICOS DEL ARROZ BAJO RIEGO POR GOTEO
EMPLEANDO EL MODELO AQUACROP”**

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

FRANK LUIGUI GAGO TOLENTINO

**LIMA – PERÚ
2021**

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA

**“EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL AIRE EN LOS ESTADOS
FENOLÓGICOS DEL ARROZ BAJO RIEGO POR GOTEO
EMPLEANDO EL MODELO AQUACROP”**

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

Presentado por:

BACH. FRANK LUIGUI GAGO TOLENTINO

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Mg. Sc. GUILLERMO CLEMENTE AGUILAR GIRALDO
Presidente

Dra. LIA RAMOS FERNÁNDEZ
Asesora

Dra. ELIZABETH CONSUELO HEROS AGUILAR
Miembro

Ing. ANTONIO CELESTINO ENCISO GUTIÉRREZ
Miembro

Dr. FREDY OMIS CACERES GUERRERO
Co-Asesor

LIMA – PERU
2021

DEDICATORIA

A Dios por enseñarme a valorar los sacrificios y ayudarme a no claudicar en cumplir mis objetivos.

A mi madre Edelinda, mi padre Enrique por enseñarme a que las cosas se consiguen en base a sacrificio, constancia y hermano Roger por su amor, paciencia y dedicación en cada momento de mi vida y alentarme siempre en pro de mis metas y felicidad.

A Karen, mi compañera de vida, por ser parte de mi camino, soporte y compartir los esfuerzos y alegrías de la vida.

AGRADECIMIENTO

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

A mi asesora, Dra. Lía Ramos Fernández, por la paciencia, tolerancia, comprensión y apoyo incondicional durante toda la elaboración del presente trabajo de investigación, y al grupo de investigación DANI “Teledetección y cambio climático aplicado a los recursos hídricos y la agricultura” por las enseñanzas y apoyos en todo momento.

A mi coasesor, Dr. Fredy Omis Cáceres Guerrero, por sus palabras, conocimiento y consejos brindados a lo largo de mi formación profesional y elaboración del presente proyecto.

A mis docentes del pregrado que iniciaron y consolidaron mi formación profesional, preparándome con sabia paciencia, ética y compartiendo sus experiencias para pulir mis aprendizajes.

A mis compañeras/os de aula, por compartir día a día nuestros temores iniciales, el estrés de los exámenes, las largas jornadas de grupos de estudios, motivarnos ante las dificultades, por todo aquello que vivimos en nuestra casa de estudios.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	2
II. REVISIÓN DE LA LITERATURA	3
2.1. Cultivo de arroz.....	3
2.1.1. El arroz en el Perú.....	4
2.2. Estrés abiótico en el arroz	6
2.3. Genes tolerantes al frío	9
2.3.1. Efecto en el contenido de la clorofila y la fluorescencia	10
2.3.2. Efectos a nivel de la membrana celular	11
2.3.3. Producción de azúcares por efecto adverso de la temperatura	12
2.3.4. Efecto de la temperatura a nivel molecular.....	13
2.3. Modelo agrometeorológico Aquacrop	14
2.3.1. Parámetros del modelo Aquacrop.....	17
2.3.2. Estrés térmico del modelo Aquacrop.....	19
III. METODOLOGÍA	22
3.1. Zona de estudio	22
3.1.1. Agua y suelo	24
3.1.2. Clima.....	25
3.2. Materiales, equipos y herramientas computacionales.....	26
3.2.1. Material genético	26
3.2.2. Equipos, herramientas y otros materiales	26
3.3. Procedimiento	27
3.3.1. Caracterización fenológica y grados días de desarrollo (GDD) del cultivo	28
3.3.2. Estimación del coeficiente de estrés térmico del cultivo	35
3.3.3. Calibración del modelo Aquacrop	36
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	40
4.1. Caracterización fenológica y GDD del cultivo.....	40
4.2. Estrés térmico.....	45

4.2.1 Estrés térmico del cultivo.....	45
4.3. Calibración de parámetros	49
4.3.1 Cobertura del dosel	49
4.3.2. Humedad del suelo.....	50
V. CONCLUSIONES.....	53
VI. RECOMENDACIONES	54
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
VIII. ANEXOS	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Estadísticas agrarias del cultivo de arroz en el Perú.....	4
Tabla 2: Efecto de la temperatura en la planta del arroz.....	7
Tabla 3: Rangos de temperatura según fase fenológica de la variedad IR-43	7
Tabla 4: QTL asociado con la tolerancia en el arroz	10
Tabla 5: Características de las parcelas del AER.....	23
Tabla 6: Características de la variedad de arroz	26
Tabla 7: Equipos usados en la investigación	27
Tabla 8: Herramientas computacionales empleadas en la investigación.....	27
Tabla 9: Fórmulas para la obtención de los GDD.....	29
Tabla 10: Fórmulas para la obtención de los GDD por fase fenológica.....	30
Tabla 11: Calendario agrícola de la campaña del cultivo	34
Tabla 12: Parámetros conservativos del modelo agrometeorológico AquaCrop.....	37
Tabla 13: Indicadores estadísticos a evaluación de la eficiencia del modelo	39
Tabla 14: GDD por fase fenológicas	44
Tabla 15: Indicadores agronómicos en el cultivo de arroz	44
Tabla 16: Indicadores estadísticos de la evaluación de la cobertura del dosel	50
Tabla 17: Indicadores estadísticos de la evaluación de la humedad del suelo.....	51
Tabla 18: Parámetros conservativos utilizados en la investigación obtenidos en campaña del 2017 (feb–ago).....	52
Tabla 19: Datos recopilados de la estación meteorológica.....	63
Tabla 20: Registro de aplicaciones de lámina de riego.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Fases fenológicas del cultivo de arroz.....	3
Figura 2: Señalización de la biología de la semilla del arroz	8
Figura 3: Membrana celular del arroz.....	12
Figura 4: Esquema de funcionamiento del modelo AquaCrop.....	16
Figura 5: Esquema del sistema de funcionamiento del software	17
Figura 6: Comportamiento de la cobertura del dosel en el ciclo del cultivo	19
Figura 7: Comportamiento de la curva de estrés por temperatura fría ($K_{Spol,c}$)	20
Figura 8: Comportamiento de la curva de estrés por temperatura caliente ($K_{Spol,h}$)	21
Figura 9: Vista tridimensional del Área Experimental de Riego (AER)	22
Figura 10: Esquema de la distribución de la zona de investigación	23
Figura 11: Diagrama de la caracterización del agua.....	24
Figura 12: Datos colectados de la estación meteorológica	25
Figura 13: Procedimiento utilizado en la investigación.....	28
Figura 14: Proceso para la obtención de la cobertura del dosel.....	31
Figura 15: Proceso de recojo de datos de la humedad del suelo.....	32
Figura 16: Comportamiento del coeficiente de estrés por temperatura (K_s) por frío	36
Figura 17: Fases fenológicas del cultivo de arroz.....	42
Figura 18: Variación y rangos de temperaturas de crecimiento óptimo	45
Figura 19: Curva de estrés térmico por frío en la polinización y según GDD.....	46
Figura 20: Porcentaje de reducción de la biomasa según estrés térmico ($StBio$)	46
Figura 21: Panel de resultados de la simulación del modelo	47
Figura 22: Variación y rangos de temperaturas óptimas en las regiones de Lambayeque y Arequipa	49
Figura 23: Variación temporal de la cobertura del dosel.....	50
Figura 24: Datos comparativos de la humedad del suelo	51
Figura 25: Gráfico de calibración de los instrumentos de humedad.....	60
Figura 26: Comportamiento del cultivo en su fase vegetativa.....	61
Figura 27: Toma de área de cobertura del dosel	62

Figura 28: Análisis de agua del canal	69
Figura 29: Análisis de suelo – salinidad y sodicidad.....	70
Figura 30: Componentes del sistema de riego del AER	71
Figura 31: Análisis cobertura del dosel y humedad del suelo	72

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: CUADRO DE CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES DE HUMEDAD.....	60
ANEXO 2: PANEL FOTOGRÁFICO DEL DESARROLLO DEL CULTIVO.....	61
ANEXO 3: PANEL FOTOGRÁFICO PARA LA MEDICIÓN DEL ÁREA DEL DOSEL.....	62
ANEXO 4: INFORMACIÓN METEOROLÓGICA DEL LUGAR DEL EXPERIMENTO.....	63
ANEXO 5: LÁMINA APLICADA EN EL CULTIVO DE ARROZ EN LA PARCELA DE AER.....	67
ANEXO 6: ANÁLISIS DE SUELO Y AGUA.....	69
ANEXO 7: SISTEMA DE RIEGO EN EL ÁREA EXPERIMENTAL DE RIEGO (AER).....	71
ANEXO 8: RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO AQUACROP.....	72

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

°C	Grados centígrados
ADN	Ácido desoxirribonucleico
AER	Área Experimental de Riego
B	Biomasa acumulada
BUMA	Buen uso y manejo de agroquímicos
C3	Clasificación de la Tasa de Evaporación
Ca ⁺²	Ion Calcio
CC	Cobertura del Dosel
CCo	Cobertura del Dosel Inicial
CCx	Cobertura del dosel máximo
CDC	Coefficiente de Disminución del Dosel
CGC	Coefficiente de Crecimiento del Dosel
cm	Unidad de longitud, centímetro lineal
CO ₂	Dióxido de carbono
CV(RMSE)	Error de la raíz cuadrática media normalizada
d	Índice de Willmott
DDS	Días Después de la Siembra
DICTA	Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuarias
dS m ⁻¹	Unidad de conductividad eléctrica, deciSiemens por metro
ECA	Estándares de calidad ambiental
EF	Eficiencia de Nash – Sutcliffe
ETo	Evapotranspiración potencial
FAO	Organización de la Naciones Unidas para Alimentos y Agricultura
FDR	Reflectometría en el Dominio de Frecuencia
Fm	Fluorescencia máxima
Fv	Fluorescencia variable
GDD	Grados días de desarrollo
GS1	Sensor de humedad
H ⁺	Ion Hidrógeno

H ₂ O ₂	Peróxido de Hidrógeno
ha	Unidad de área, hectárea
HI	Índice de cosecha
HIo	Índice de cosecha de referencia
HO ⁻	Radical hidroxilo
INIA	Instituto de Investigaciones Agropecuarias
INIA	Instituto Nacional de Innovación Agraria – Perú
Kc	Coefficiente del cultivo
Ks	Coefficiente de estrés
K _{spol,c}	Coefficiente de estrés por temperatura baja para la polinización
K _{spol,h}	Coefficiente de estrés por temperatura alta para la polinización
m s ⁻¹	Unidad de velocidad, metro por segundo
m	Unidad de longitud, metro lineal
m ²	Unidad de área, metro cuadrado
m ³	Unidad de volumen, metro cúbico
MDA	Malondialdehído
MINAGRI	Ministerio de Agricultura y Riego
MJ*día ⁻¹ *m ⁻²	Unidad de la radiación solar
mm	Unidad de la precipitación
N ^o	Número
NRMSE	Raíz del error cuadrático normalizado
O ₂ ⁻	Óxido
pH	Unidad de acidez de una solución, potencial de hidrógeno
PSII	Photo System II
r	Coefficiente de correlación de Pearson
ROS	Sustancias Reactivas al Oxígeno
RSR	Relación del RMSE con la desviación estándar
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
t ha ⁻¹	Unidad de rendimiento, tonelada por hectárea
Tb	Temperatura basal
Tn cold	Umbral de Temperatura Específica

Tn	Temperatura Mínima diaria
Tr	Transpiración del cultivo
Tupper, Tx	Temperatura máxima
Tx,heat	Temperatura máxima diaria
UNALM	Universidad Nacional Agraria La Molina
WP	Productividad del agua
WP*	Productividad del agua normalizada
$\bar{x} \pm S$	Promedio, más o menos, desviación estándar
Y	Rendimiento
Zn	Profundidad mínima de raíz
Zx	Profundidad máxima de raíz

RESUMEN

El estudio se realizó en el Área Experimental de Riego (AER) de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú, en los meses de enero a agosto del 2017. Esta investigación abordó el tema del efecto de la temperatura del aire en los estados fenológicos del arroz, debido a que las zonas productoras del cultivo son vulnerables a la variabilidad climática que es reflejada en cambios de temperatura y afecta negativamente en la producción del cultivo; esta variación es acentuada con El Fenómeno El Niño y la polución de las ciudades. El objetivo central fue evaluar el efecto de la temperatura en los estados fenológicos, aplicando la calibración del modelo AquaCrop bajo un sistema de riego por goteo, y la utilización de los grados días de desarrollo (GDD), siendo una unidad de medida que cuantifica la ganancia de energía de la planta, para estimar el crecimiento de forma más exacta. Se planteó una metodología con enfoque cuantitativo, de alcance analítico y de diseño concluyente. Para la calibración del software AquaCrop se calcularon los parámetros del modelo con ayuda de la información recopilada en campo. Todos estos pasos previos y el trabajo de campo realizado, permitió evaluar los cambios físicos que se visualizaron durante el periodo vegetativo del cultivo, éstos fueron asociados a los estados fenológicos del arroz, dando énfasis al estado de floración en el momento de la fecundación del grano, cuyo proceso resultó de la producción y rendimiento del cultivo. De acuerdo con el análisis de los resultados, se concluye que uno de los parámetros calibrados relacionado con la temperatura del aire, que incide en la floración hasta la maduración de grano del cultivo, es representado con un parámetro de estrés térmico (K_{spol}), el cual fue expresado por un coeficiente de estrés variando de cero a uno que obedece a un rango de temperatura identificado de forma interactiva por el modelo AquaCrop que incide en la generación de biomasa. Asimismo, mostró que la producción de grano fértil, será afectada de manera importante, si la planta está expuesta por tiempo prolongado a temperaturas bajas.

Palabras claves: Aquacrop, arroz (*oryza sativa*), temperatura, estrés térmico, fases fenológicas.

ABSTRACT

The study was carried out in the Experimental Irrigation Area (AER) of the National Agrarian University La Molina, Lima - Peru, from January to August 2017. This research addressed the issue of the effect of air temperature in the states phenological of rice, because the production areas of the crop are vulnerable to climatic variability that is reflected in changes in temperature; This variation is accentuated with the El Niño phenomenon and the pollution of the cities. The main objective was to evaluate the effect of temperature in the phenological states, applying the calibration of the AquaCrop model under a drip irrigation system, and the use of the degree days of development (GDD), being a unit of measurement that quantifies the plant energy gain, to estimate growth more accurately. A methodology with a quantitative approach, analytical scope and conclusive design was proposed. For the calibration of the AquaCrop software, the model parameters were calculated with the help of the information collected in the field. All these previous steps and the field work carried out, allowed us to evaluate the physical changes that were visualized during the vegetative period of the crop; these were associated with the phenological states of the rice, emphasizing the state of flowering at the time of fertilization of the grain. , whose process resulted from the production and yield of the crop. According to the analysis of the results, it is concluded that one of the calibrated parameters related to the air temperature, which affects flowering until the maturation of the crop grain, is represented with a thermal stress parameter (Kspol), the which was expressed by a stress coefficient varying from zero to one that obeys a temperature range identified interactively by the AquaCrop model that affects the generation of biomass. Likewise, it showed that the production of fertile grain will be significantly affected if the plant is exposed to low temperatures for a long time.

Key words: Aquacrop, rice (*oryza sativa*), temperature, heat stress, phenological phases.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la variabilidad de la temperatura se presenta con mayor frecuencia, con ello el cambio climático cada año se acentúa en el orbe; esto afecta al grado de intensidad de cómo se manifiestan las corrientes marinas, como la corriente de Humboldt del sur y la corriente de aguas cálidas del norte; las cuales generan el clima desértico de las principales zonas arroceras costeñas (Arequipa, La Libertad, Lambayeque y Piura). Los principales departamentos de producción de arroz atienden la creciente demanda de la población, siendo este cereal un insumo principal de la canasta básica familiar, y las extensiones agrícolas destinadas para la producción de arroz no satisfacen la oferta galopante. Las áreas agrícolas existentes deben incrementar el rendimiento e identificar algún factor que pueda mermar las toneladas por hectárea.

La cobertura del grano se forma en la panícula y se fecundan en la fase de floración en el proceso de la polinización, inicio de la producción del cultivo, este proceso requiere un rango de temperatura de 30 a 33 °C según Chaudhary, R., Nanda, J., Tran, D. (2003). Teniendo en cuenta que la temperatura es un factor climático que puede afectar el proceso de la fecundación del grano y por ende mermar la producción de las áreas agrícolas. A pesar de todo esto, la productividad del cultivo de arroz ha tenido una buena respuesta en el país.

Se estima que la producción de arroz debe incrementarse alrededor del 60 por ciento para satisfacer las necesidades dietéticas para el año 2025, ocasionado por el explosivo aumento demográfico mundial (Korres, N.; Norsworthy, J.; Tehranchian, P.; Gitsopoulos, T.; Loka, D.; Oosterhuis, D.; Moss, S.; Gealy, D.; Burgos, N.; Miller, R.; Palhano, M.; 2016). Sin embargo, el creciente estrés ambiental, asociado al continuo deterioro y la contracción de las tierras cultivables y la escasez de agua de riego plantean graves amenazas a la producción mundial de arroz (Korres *et al.*, 2016). Considerando el cambio climático, en las diferentes fases fenológicas se caracterizan por tener requerimientos diferentes de temperatura para un crecimiento y

desarrollo normal. Teniendo en cuenta los resultados del informe de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura [FAO], (2012) que es una agencia de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) encargada del tema de seguridad alimentaria de los países miembros, indica los rangos de temperatura crítica mínima y máxima en diferentes etapas de crecimiento del arroz, es decir, a la germinación (16,00 – 45,00 °C), a la erupción de semillero (12,00 – 35,00 °C), tallado (9,00 – 33,00 °C), cabeza de panícula (15,00 – 30,00 °C), antesis (22,00 – 35,00 °C) y maduración (12,00 – 30,00 °C).

Se debe tener en cuenta, en situaciones que el clima exceda los rangos de temperatura óptima, la planta sufre una perturbación en el desarrollo de su crecimiento y para poder analizar este escenario desde el punto matemático empleamos el modelo AquaCrop de la FAO (<http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>) que permite evaluar el efecto de diversos factores, entre ellos, la temperatura en el crecimiento del cultivo (FAO, 2012). El estrés por temperatura, puede dividirse en: estrés por temperatura alta y por temperatura baja, que afectan de manera diferente en la fenología del cultivo de arroz; traduciéndose finalmente en la productividad de biomasa y de grano.

1.1 Objetivos

El objetivo general de la investigación es evaluar el efecto de la temperatura del aire en los estados fenológicos del cultivo de arroz bajo riego por goteo empleando el modelo agrometeorológico AquaCrop. Esto se cumplirá a través de los siguientes objetivos específicos:

- a. Caracterizar la fenología y Grados Días de Desarrollo (GDD) del cultivo del arroz.
- b. Obtener el coeficiente de estrés térmico y rango de temperatura óptima para el desarrollo del cultivo.
- c. Calibrar el modelo AquaCrop para obtener parámetros fisiológicos y climáticos.

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. Cultivo de arroz

El arroz, planta monocotiledónea del género *Oryza*, comprende 23 especies de las cuales se cultivan dos, *Oryza Sativa* L., originaria del trópico húmedo de Asia y *Oryza glaberrima* Steud., originaria de África Occidental. A ellas pertenecen las más de dos mil variedades cultivadas en todos los continentes, a excepción del Antártico, en todo tipo de condiciones climáticas, edáficas y por riego por inundación como muestran las publicaciones de la FAO (2012). El riego por inundación se utiliza desde la domesticación de la planta en sus diversas variedades, desde las encontradas a más de 2600 msnm, en el Himalaya, hasta variedades que se producen cercanas al litoral, en el delta de Mekong debido a las raíces anaeróbicas que posee la planta. Este sistema de riego inundado se conoce como melgas según Korres et al., (2017). El desarrollo de la variedad mencionada se visualiza en la siguiente Figura 1.

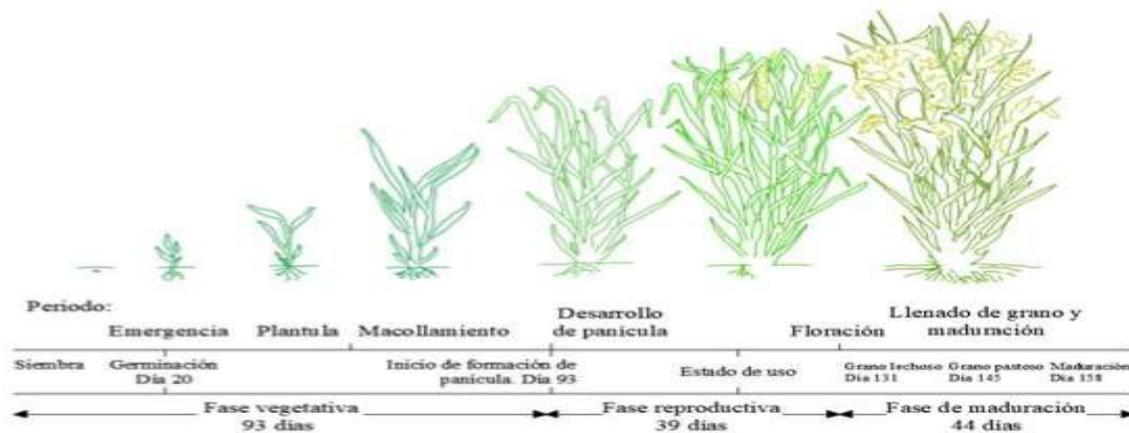


Figura 1: Fases fenológicas del cultivo de arroz

Oryza Sativa es de las especies más cultivadas alrededor del orbe, ya que, posee uno de los óptimos potenciales para la producción de carbohidratos por unidad de superficie por día. Es una planta C3, se denomina así porque no tiene adaptaciones fotosintéticas para reducir la fotorespiración, pero con una importante tasa de actividad fotosintética.

En la actualidad el arroz es el segundo cultivo del mundo en producción después del trigo. Este cereal es el ingrediente principal en la dieta de millones de personas en los países de Asia y Sudamérica, en el resto del orbe es el trigo según FAOSTAT (2019). La superficie mundial cultivada ha ascendido entre 1961 y 2019 de 115,5 a 192 millones de hectáreas, mientras que la producción casi se ha triplicado en ese tiempo, con una productividad variable entre 2,0 y 9,7 t ha⁻¹, correspondiendo a las peores cifras a África y valores máximos a los continentes de América del Norte y Europa (FAOSTAT, 2019).

2.1.1. El arroz en el Perú

La producción del arroz en el Perú, desde 1970 a la actualidad ha crecido 9,6 veces, pasando de 331877 a 3188306 t (FAOSTAT, 2019). Este crecimiento en la producción se ha dado por el incremento del área sembrada como también de la productividad del cultivo. A fines de los 70's se sembraron alrededor de 81 086 ha, mientras que para el año 2019 el área cosechable fue de aproximadamente de 414 509 ha, un aumento de más de 5 veces el área de producción. Por su lado, la productividad promedio nacional del cultivo ha mantenido una tendencia positiva durante el período mencionado, pasando de aproximadamente 4,5 t ha⁻¹ a los 8,1 t ha⁻¹, debido a la buena adaptación del cereal en las zonas productoras del país la producción ha aumentado paulatinamente y con un menor consumo de agua como se muestra en la siguiente Tabla 1 (FAOSTAT, 2019).

Tabla 1: Estadísticas agrarias del cultivo de arroz en el Perú

Año	Área de cultivo (ha)	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Producción (t)
1961	81 086	4,09	331,877
1970	140 395	4,18	586,721
1980	102 532	4,30	441,233
1990	184 758	5,23	966,101
2000	287 113	6,59	1,892,100
2005	357 883	6,90	2,468,357
2010	388 659	7,29	2,831,374
2015	399 501	7,89	3,151,408
2016	419 563	7,55	3,165,749
2017	426 253	7,31	3,115,544
2018	437 938	8,12	3,557,900
2019	414 509	7,69	3,188,306

Fuente: Data de FAO, www.fao.org/faostat/es/#data/QC, 2019

La adaptabilidad del cultivo está relacionada con el clima, que influye en el calendario agrícola, por eso se tiene dos campañas agrícolas, la campaña grande de agosto a marzo y la campaña pequeña de abril a julio (MINAGRI, 2018). En tanto, las zonas costeras productoras son Lambayeque, La Libertad, Piura y Arequipa con rendimiento promedio de 8,70 t ha⁻¹; mientras que en la selva están los departamentos de Cajamarca, Amazonas, San Martín y Huánuco con rendimiento promedio de 7,40 t ha⁻¹ (MINAGRI, 2018).

El cultivo de arroz puede desarrollarse en varios tipos de suelos, desde la textura de arenosa a textura arcillosa. Generalmente se cultiva en suelos de textura fina y media, representativos de llanuras inundadas y deltas de los ríos. Los suelos de textura fina dificultan las labores agronómicas, pero son más fértiles al tener mayor contenido de arcilla, materia orgánica y contenido de nutrientes. En consecuencia, la textura del suelo es importante en el manejo de riego y de los fertilizantes. Asimismo, es importante tener en cuenta la demanda de agua del cultivo en el riego por gravedad (método tradicional): 13000 m³ha⁻¹ (MINAGRI, 2018).

Teniendo en cuenta, la expansión de la frontera agrícola, la demanda de agua del cultivo de arroz en zonas desérticas y la disminución de la disponibilidad de agua, el sistema de riego actual, bajo inundación, resulta insostenible ante escenarios futuros de sequía. Ante tal situación, se debe adoptar tecnologías de riego, como el riego por goteo, que permitan el ahorro de agua. Altamirano, (2018) menciona que para la variedad de arroz IR43 en la campaña 2018, en condiciones de La Molina y riego por goteo, emplea un volumen de 7438 m³ ha⁻¹, resultando una disminución de 37% a 62% en comparación a la media nacional (Heros, 2012).

En cuanto a las variedades cultivadas en el país según el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego [MIDAGRI], (s.f.) en la costa norte son la Viflor, Inti, Sican, Costa Norte, Taymi, Oro, Santa Ana, San Antonio y NIR-I; en la costa sur son Viflor, BG-90, San Antonio y NIR I y en la ceja de Selva son Alto Mayo, El Porvenir, Amazonas Huarangopampa, Utcubamba, Moro, Saavedra, San Antonio, Capirona y Yacumayo.

2.2. Estrés abiótico en el arroz

La temperatura es uno de los factores climáticos que tiene influencia sobre el crecimiento de la planta a nivel celular, con la producción de la clorofila y en especial con los procesos fisiológicos relacionados con la formación del grano. Este factor abiótico al igual que las otras variables climatológicas, afecta directamente a los estados fenológicos del cultivo, causando un daño permanente que se ve reflejado en las plantas a simple vista y en su capacidad reproductiva, como se explicará posteriormente.

La planta afectada por estrés de temperatura baja puede inhibir la síntesis de clorofila y la formación de cloroplastos en las hojas de arroz (Zhang, Q; Chen, Q; Wang, Sh; Hong, Y; Wang, Zh; 2014). Y se puede inferir que un nivel bajo de clorofila en la planta es consecuencia de estrés por temperaturas bajas en la planta de arroz. La fase de floración es afectada, incluso durante menos de una hora a 33,70 ° C, puede dar como resultado la esterilidad de las espiguillas que aumentará significativamente cuando la temperatura supere los 35,00 ° C (Rang Z.W.; Jagadish S.V.K.; Zhou Q. M.; Craufurd P.Q.; Hever S., 2011).

El estrés térmico afecta negativamente la tasa de crecimiento, formación de órganos y el desarrollo de las plantas de arroz, a estos efectos se le denomina estrés térmico, los rangos óptimos de temperatura para el normal crecimiento del cultivo se puede apreciar en la Tabla 2 publicada por Chaudhary et al., (2003). El estrés a las altas y bajas temperaturas por encima y por debajo respectivamente de los límites críticos afectan en todos los estados fenológicos, pero principalmente en la etapa de reproducción (floración) de la planta, incidiendo en la productividad del cultivo. Cabe mencionar, que la duración de los estados fenológicos variará debido al aumento o disminución de la temperatura, esta incidencia afectará al desarrollo y rendimiento del arroz; en relación con el sistema tradicional de cultivo arroz deberá adecuarse a los nuevos entornos que se irán manifestando, tomando como punto de partida los rangos de temperatura óptima de la planta de arroz mencionada por Korres *et al.*, (2016).

Tabla 2: Efecto de la temperatura en la planta del arroz

Crecimiento y desarrollo de la planta	Temperatura mínima (°C)		Temperatura máxima (°C)		Temperatura óptima (°C)
	Rango	Efecto	Rango	Efecto	
Germinación	10	Inhibición	45	-	20 – 35
Emergencia de la plántula	12–13	Demorada	35	-	25 – 30
Enraizamiento	16	Raquitismo	35	-	25 – 28
Quinta hoja	7 – 12	Decoloración de la hoja, raquitismo	45	Punta blanca, bandas cloróticas y manchas	31
Macollamiento	9 – 16	Reducido	33	Reducido	25 – 31
Iniciación de la panoja	15	Demorada	-	<i>Panoja</i> blanca	-
Diferenciación de la panoja	15–20	Degeneración del ápice de la panoja, alta esterilidad de la espiguilla	38	Número reducido de espigas	-
Exerción de la panoja	22	Exerción incompleta, floración demorada	35	Esterilidad	30 – 33
Grano	12–18	Madurez irregular	30	Menor llenado de grano	20 – 25

Nota: Síntomas en cada etapa de crecimiento y rango de temperatura Fuente: Chaudhary et al., (2003).

Los estudios realizados en rangos de temperaturas óptimas para el cultivo del arroz en las diferentes etapas fenológicas en el país son publicados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) como se muestra en la siguiente Tabla 3.

Tabla 3: Rangos de temperatura según fase fenológica de la variedad IR-43

Fase Fenológica	Periodo Fenológico	Temperatura Óptima (°C)	Temperatura Crítica (°C)
Emergencia		28 - 35	< 10 y 45 >
Plántula	Vegetativo	25 - 30	< 12 y 35 >
Macollamiento		25 - 28	< 16 y 35 >
Elongación de tallo		28 - 31	< 12 y 45 >
Inicio de Panícula	Reproductivo	28 - 31	< 15 y 45 >
Desarrollo de Panícula		28 - 31	< 15 y 38 >
Floración		30 - 33	< 22 y 35 >
Grano Lechoso	Maduración	20 - 25	< 12 y 30 >
Grano Pastoso		20 - 25	< 12 y 30 >
Grano Duro		20 - 25	< 12 y 30 >

Nota: Dirección de redes de observación y datos - Estación El Espinal – Lambayeque Fuente: SENAMHI, (2015).

En la fase de floración, las temperaturas inferiores al rango óptimo dan como resultado un gran porcentaje del total de granos estériles o vanos, y a pesar del efecto térmico se generan granos fértiles. Es así que según Chaudhary et al. (2003), en las etapas posteriores la temperatura del aire afecta la productividad incidiendo sobre el porcentaje de espiguillas no fertilizadas y el porcentaje de granos que maduran. A continuación, se muestran las partes del grano en la Figura 2.

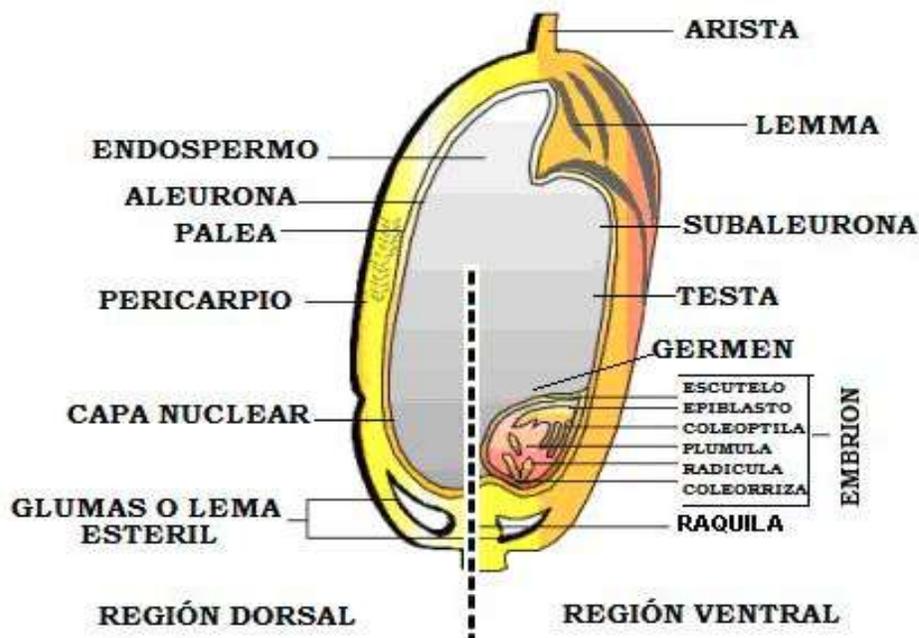


Figura 2: Señalización de la biología de la semilla del arroz

Fuente: Chaudhary et al., (2003)

La formación del grano es influenciada por la cantidad de nitrógeno disponible, sin embargo, la fertilización es sensible a la esterilidad en el caso de bajas temperaturas. Cuando las temperaturas se encuentran por encima o por debajo de niveles críticos, la provisión de nitrógeno tiene poco efecto sobre la esterilidad. La aplicación de mayores cantidades de fertilizantes fosfatados alivia los efectos adversos de altas cantidades de nitrógeno en la etapa reproductiva a bajas temperaturas. Menciona Chaudhary *et al.*, (2003) que existen variedades con tolerancia a bajas temperaturas durante la etapa de plántula. En caso necesario, es preferible seleccionar variedades que presenten resistencia al frío y estén adaptadas a la región.

2.3. Genes tolerantes al frío

La tolerancia al frío de una variedad, se puede cuantificar a través del loci cuantitativos de rasgos (QTL) controlado por múltiples genes. Generalmente es difícil asociar directamente los fenotipos de las plantas con los genes responsables de la tolerancia al frío, la selección asistida por marcador es un medio eficaz para desarrollar cultivares resistentes (Shirasawa et al. 2012; Foolad et al. 1999).

Las evaluaciones de las variedades de arroz para aumentar la resistencia al frío se realizan mayormente durante las fases de plántula, grano lechoso, grano pastoso y grano duro (Zhang *et al.*, 2014). La tolerancia al frío en la etapa de germinación es un factor principal del establecimiento rápido de las plántulas y el desarrollo de un cultivo uniforme, especialmente en los sistemas de producción de siembra directa (Krishnasamy y Seshu, 1989). Teniendo en cuenta, que el cultivo de arroz se siembra en regiones que varían de tropical a templado, una variación considerable como en el grado de tolerancia al frío es exhibida por las plántulas de varias accesiones de germoplasma de *O. sativa* (Kim y Tai, 2011).

El desarrollo de marcadores moleculares segregados y mapas de emparejamiento ha permitido identificar QTL que controlan la tolerancia al frío en el arroz en cada etapa del cultivo (germinación, plántula, reproductiva). Según Zhang *et al.*, (2014); la mayoría de los QTL se han mapeado de poblaciones derivadas de cruces entre variedades de *O. Japonica* y *O. Indica*, y entre el arroz cultivado y sus parientes silvestres; según como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: QTL asociado con la tolerancia en el arroz

Nombre del QTL	Año	Rasgo del mapeo	N° cromosoma
Ctb1, Ctb2	2001	Fertilidad de la espiguilla / Espiguilla no desarrollada	4
qCTB2a, qCTB3	2003	Fertilidad de la espiguilla / Espiguilla no desarrollada	2, 3
qCTS12a	2003	Crecimiento de plántulas	12
Ctb1	2004	Fertilidad de la espiguilla	4
Dth, cl, fer, pe, dc	2004	Días hasta el rumbo / Longitud del culmo / Fertilidad de la espiguilla / Exposición del cuello de la panícula / Decoloración	1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11
qSV-3-1/2, -5, -8-1/2	2005	Crecimiento de plántulas	3, 5, 8
qLVG2, qLVG7-2, qCIVG7-2	2006	Vigor de la germinación	2, 7
qCTS12	2006	Crecimiento de plántulas	12
qCTS4	2007	Crecimiento de plántulas	4
qCTS-2	2007	Crecimiento de plántulas	2
qLTG3-1	2008	Vigor de la germinación	3
qCTB-1-1, -4-1/2, -5-1/2, -10-1/2, -11-1	2008	Fertilidad de la espiguilla	1, 4, 5, 10, 11
qCTP11, qCTP12	2009	Vigor de la germinación	11, 12
qPSST-3, -7, -9	2010	Fertilidad de la espiguilla / Crecimiento en etapa reproductiva	3, 7, 8, 9, 11
Ctb1	2010	Fertilidad de la espiguilla / Espiguilla no desarrollada	4
qCtss11	2010	Crecimiento de plántulas	11
qCTB-5-1/2/3, -7	2010	Vigor de la germinación	5, 7
qCTS4a, qCTS4b	2012	Crecimiento de plántulas	4
qLTB3	2012	Fertilidad de semillas	3

Fuente: Adaptado de Zhang et al., (2014)

2.3.1. Efecto en el contenido de la clorofila y la fluorescencia

El contenido de clorofila y la fluorescencia, medida como la relación de fluorescencia variable (Fv) a fluorescencia máxima (Fm), son dos propiedades fotosintéticas cuyos cambios son relevantes para respuestas de estrés térmico en plantas. La disminución del contenido de clorofila puede significar la disminución de concentración de los nutrientes en general, y en particular de nitrógeno o azufre (Haboudane *et al.*, 2002). El estrés por temperatura baja puede inhibir la síntesis de clorofila y la formación de cloroplastos en las hojas de arroz. Por lo tanto, el contenido reducido de clorofila puede indicar el efecto de la baja temperatura en las plantas de arroz (Sharma *et al.*, 2005).

Teniendo en cuenta, la relación de fluorescencia variable y fluorescencia máxima (F_v/F_m) es una medida de la fluorescencia de la clorofila que se utiliza comúnmente para determinar la máxima eficiencia cuántica del Photosystem II (PSII), que indica si el estrés por temperatura baja ha comprometido la PSII en su estado de adaptación a la oscuridad (McFarlane *et al.*, 1980). Durante el estrés por baja temperatura, los valores de F_v / F_m disminuyen ligeramente en las plantas que toleran el frío, pero disminuyen significativamente en las plantas sensibles al frío (Bonnecarrère *et al.*, 2007). Este parámetro se puede utilizar para cuantificar el nivel de tolerancia de un cultivo a bajas temperaturas o a la adaptación a este estrés abiótico.

2.3.2. Efectos a nivel de la membrana celular

Los cambios en la temperatura ambiente pueden afectar rápidamente a las membranas celulares, aunque éste es un proceso reversible (Murata *et al.*, 1997). Los cambios en la fluidez de la membrana se miden por el índice de polarización de la membrana p , un indicador inverso de la fluidez de la membrana (Sangwan *et al.*, 2002).

Las células de arroz pueden detectar el estrés por frío en función de los cambios en la rigidez de la membrana, el estado físico de las proteínas de la membrana y la presión osmótica (Murata *et al.*, 2002). Es así, que según Chinnusamy *et al.*, (2006) las bajas temperaturas originan una mayor rigidez de la membrana que impiden el normal funcionamiento como muestra la Figura 3, además, la afluencia de Ca^{+2} en el citoplasma, es uno de los primeros indicadores de estrés por temperatura baja, un síntoma de Ca^{+2} vuelve más rígida la membrana mediante estímulos mecánicos.

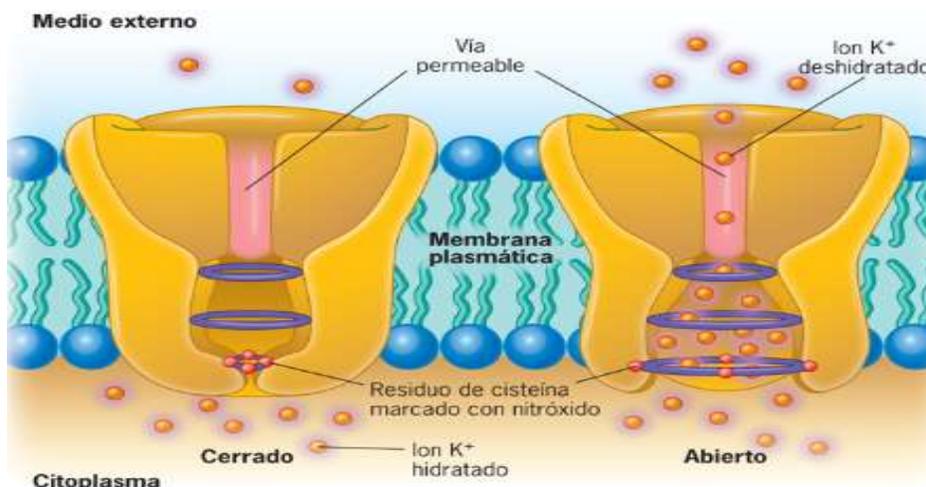


Figura 3: Membrana celular del arroz

Nota: En el lado izquierdo membrana cerrada por estrés térmico y en el lado derecho normal funcionamiento de la membrana celular. Fuente: Chaudhary *et al.*, (2003).

2.3.3. Producción de azúcares por efecto adverso de la temperatura

Los azúcares solubles que se acumulan en plantas que están bajo estrés térmico son la sacarosa, hexosa, rafinosa, glucosa, fructosa y trehalosa. Estos azúcares actúan como solutos compatibles en el estrés por temperatura baja, sirviendo como osmoprotectores contra el daño por congelación-deshidratación (Nagao *et al.*, 2005) y (Yuanyuan *et al.*, 2010). Debido a que los contenidos de sacarosa, trehalosa, rafinosa y estaquiosa pueden aumentar a baja temperatura, estos metabolitos pueden usarse como indicadores para evaluar la tolerancia al frío de las variedades de arroz (Morsy *et al.*, 2007). A continuación, se mencionan los atributos en presencia de la prolina, que identificaron los siguientes autores:

- La acumulación de prolina también se ve reforzada por estrés a bajas temperaturas y de actuar como un reservorio de carbono y nitrógeno, además de proteger a las enzimas celulares de la desnaturalización (Shah y Dubey 1997).
- Kandpal y Rao (1985) mencionaron que la prolina estabiliza el polirribosoma y, por tanto, mantiene la operación de la síntesis de proteínas.
- La prolina también participa en la eliminación del exceso de H^+ relacionado con el estrés y mantiene la respiración oxidativa a un pH citosólico óptimo según Venekamp, (1989).

- Schobert y Tschesche, (1978) concluyeron que la prolina aumenta la capacidad de unión al agua de proteínas a través de sus interacciones hidrofóbicas con los residuos superficiales de las proteínas.
- El aumento del contenido de prolina se ha observado ampliamente en variedades de arroz a bajas temperaturas. Finalmente, las correlaciones significativas entre el contenido de prolina y la tolerancia al frío han ayudado a confirmar la función de la prolina durante la respuesta al frío en el arroz (Kim y Tai, 2011).

2.3.4. Efecto de la temperatura a nivel molecular

La planta del arroz tiene diversas respuestas a la afección de las bajas temperaturas, una de ellas es el aumento de los contenidos de especies reactivas de oxígeno (reactive oxygen species - ROS), son moléculas reactivas al oxígeno que pueden ser óxido (O_2), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) o el radical hidroxilo (HO^\cdot). Las ROS se producen en niveles bajos como subproductos normales del metabolismo celular de las plantas, principalmente en organelos como los cloroplastos, mitocondrias y peroxisomas. Sin embargo, tanto el estrés biótico como el estrés abiótico pueden conducir a una producción excesiva de ROS que luego pueden reaccionar rápidamente con proteínas, ADN y lípidos y causar daño oxidativo celular (Apel y Hirt, 2004), (Mittal *et al.*, 2012).

Suzuki y Mittler, (2006) mencionaron que el cloroplasto, son orgánulos mayores que están situados en las hojas de la planta donde se realiza la fotosíntesis, las ROS pueden causar sobre-reducción de la cadena de transporte de electrones, limitando el proceso de absorción del CO_2 e interferir con el proceso fotosintético. Además, pueden causar daños durante el estrés a través de sus efectos sobre la cadena de transporte de electrones en las mitocondrias.

Al momento de formar las ROS reaccionan con los lípidos formando malondialdehído (MDA) que se acumulan durante el estrés frío en el arroz. Esto puede perjudicar el metabolismo a través del daño oxidativo celular (Nakashima *et al.*, 2007). Por otra parte, el arroz también posee estrategias para hacer frente o adaptarse al estrés frío. Por ejemplo, las plantas de arroz tratadas en frío acumulan prolina, un aminoácido que estabiliza la síntesis de proteínas y, por tanto, mantiene la función óptima de las células de arroz (Kandpal y Rao, 1985).

2.3. Modelo agrometeorológico Aquacrop

El modelo AquaCrop se basa en interacciones matemáticas guiadas por flujos de acciones, considerando el sistema suelo-planta-atmósfera como continuo, determinando valores a futuro de rendimiento de grano, generación de biomasa, productividad del agua, entre otros del cultivo; las condiciones de estas simulaciones principalmente es el agua, factor limitante de la producción que están representados en las siguientes ecuaciones.

El punto inicial del modelo es separar la evaporación del suelo no productivo de la transpiración del cultivo y estimar la producción de biomasa directamente a partir de la transpiración del cultivo real mediante un parámetro de productividad del agua.

$$B = WP * \sum Tr$$

Donde:

- B es la biomasa acumulada producida (kg/m^2),
- Tr es la transpiración del cultivo (en mm o m^3 por unidad de superficie) en el periodo que se cuantifica la biomasa producida; y
- WP es el parámetro de productividad del agua (kg de biomasa por m^2 por mm , o kg de biomasa por m^3 de agua transpirada).

En la formación del grano, en nuestro caso, una fracción de la biomasa generada por la planta se destina para los órganos cosechables para producir rendimiento (Y), y la relación entre el rendimiento y la biomasa se conoce como índice de cosecha (HI), por tanto:

$$Y = HI * B$$

Los procesos subyacentes que culminan en B y HI se diferencian claramente entre sí. En consecuencia, la separación de Y en B y HI permite considerar los efectos de las condiciones ambientales y el estrés en B y HI por separado.

La planta genera sus nutrientes a través de las hojas, el modelo cuantifica el crecimiento de la cobertura del dosel (CC) en todas las etapas fenológicas de la planta, en la primera mitad del incremento del CC se ajusta a la siguiente ecuación exponencial:

$$CC = CC_0 * e^{(CGC*t)}$$

Donde:

- CC es la fracción de suelo cubierta por el dosel cuando el tiempo es t,
- CCo es la CC inicial (cuando t = 0), también en fracción, y
- CGC es el coeficiente de crecimiento del dosel en fracción o porcentaje de la CC existente cuando el tiempo es igual a t.

En la segunda mitad, la competencia entre plantas por captar la radiación se dificulta, afectando de forma negativa la relación cobertura de dosel y fotosíntesis, por lo tanto, se añade esta ecuación exponencial de descomposición.

$$CC = CC_x - 0.25 * (CC_x^2 / CC_0) * e^{-CGC*t}$$

Donde:

- CCx es la cobertura máxima del dosel bajo condiciones óptimas.

El parámetro de WP introducido en AquaCrop se normaliza por la demanda evaporativa de la atmósfera, simbolizada como ET₀, y para la concentración de CO₂ en la atmósfera. Se comprobó que la productividad del agua normalizada para biomasa (WP*) es casi constante para un cultivo dado cuando los nutrientes minerales no son limitantes, independientemente del estrés hídrico, salvo en casos extremadamente graves. La calibración de la WP y la normalización por las demandas evaporativas se basaron en la ecuación:

$$WP * = \left[\frac{B}{\sum Tr / ET_0} \right] (CO_2)$$

Las respuestas de los cultivos al déficit de agua se simulan con cuatro modificadores que son funciones de la parte fraccional disponible de agua en el suelo en base a la demanda evaporativa, basado en la sensibilidad diferencial al estrés hídrico ante cuatro procesos clave de la planta: la expansión del dosel, control estomático de la transpiración, la senescencia del dosel, y HI. El HI puede ser modificado negativa o positivamente, dependiendo del nivel de estrés, el momento y la duración del estrés. AquaCrop utiliza un número relativamente pequeño de parámetros

(explícitos e intuitivos en su mayoría) e intenta equilibrar simplicidad, precisión y robustez (Steduto *et al.*, 2009). Así como la evaluación del contenido de humedad del suelo durante el periodo vegetativo mediante el FDR; para que las fórmulas interactúen correctamente se requieren datos de entrada consistente en parámetros climáticos, del cultivo, del suelo y agua de riego, datos de gestión del riego (Raes *et al.*, 2012). Ver Figura 4.

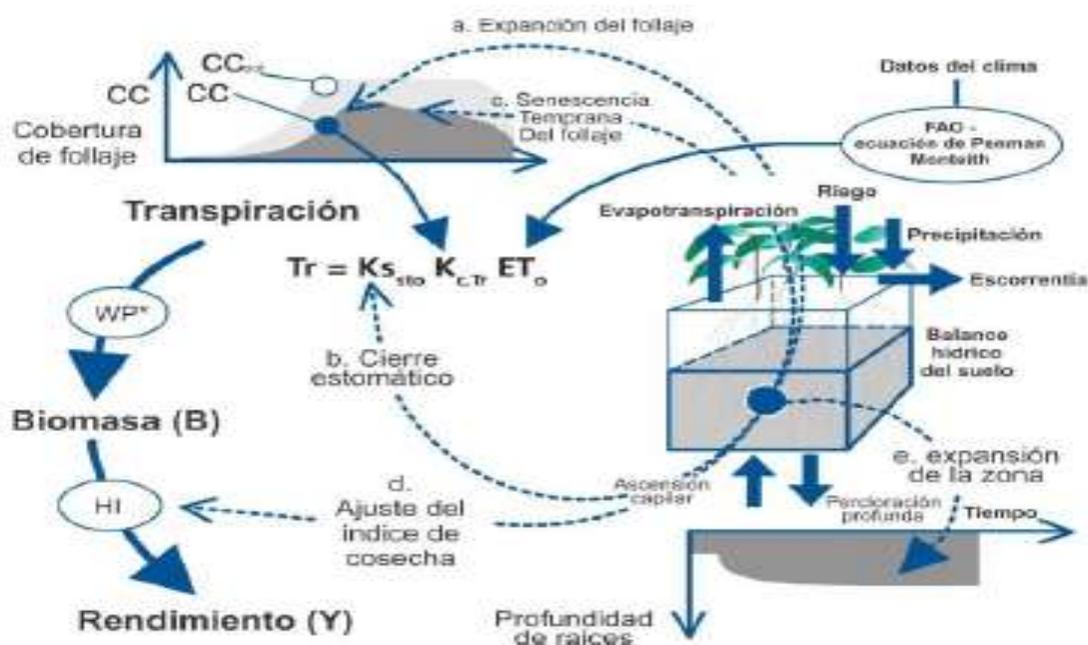


Figura 4: Esquema de funcionamiento del modelo AquaCrop

Nota: Iteraciones de las fórmulas matemáticas del Modelo AQUACROP. Fuente: Raes *et al.*, (2012)

Además, el agotamiento del agua almacenada en la zona de raíz determina un conjunto de coeficientes de estrés hídrico, estrés por temperatura cálida del aire y estrés por temperatura fría del aire, que afectan en: la expansión de las hojas, la cobertura del dosel del cultivo, el cierre y apertura de estomas, la floración, la polinización, la senescencia del cultivo, la profundidad del sistema radicular, el índice de cosecha y la productividad del agua (Raes *et al.*, 2012).

AquaCrop ha sido previamente calibrado para algunos cultivos en determinados lugares del mundo, algunos de ellos: maíz por Hsiao *et al.*, (2009), Heng *et al.*, (2009) y Katerji *et al.*, (2010), trigo por Andarzian *et al.*, (2011), algodón por Farahani, (2009), cebada por Araya *et*

que solamente se utilicen datos de CC medidos poco después de la emergencia de la plántula hasta aproximadamente el 60 por ciento de la cobertura, los cuales no incluyan períodos de alta carga de frutos en el cultivo.

- d. Días a dosel máximo (CCx): este parámetro especifica cuántos días se demora el cultivo en alcanzar el nivel máximo de cobertura del dosel.
- e. Duración del ciclo: Este parámetro permite especificar cuál es la duración del ciclo de desarrollo del cultivo.
- f. Índice de Cosecha (HI): La partición de la biomasa en la porción de rendimiento se simula mediante el HI. El usuario proporciona el HI de referencia, pero el valor que realmente tome el HI puede variar, pues el estrés por agua puede alterar el HI, bien sea negativa o positivamente, dependiendo del tiempo, la severidad y duración del estrés.
- g. Productividad del agua (WP) normalizada por la demanda evaporativa: La transpiración, el denominador de la WP, es extremadamente difícil de medir y separar de la evaporación del suelo en el campo. Afortunadamente, existen numerosos sets de datos sobre producción de biomasa versus uso consuntivo del agua, los cuales se pueden utilizar para derivar la WPB/Tr, y por ende la Productividad del agua normalizada, si se cuenta con los datos meteorológicos requeridos.
- h. Índice de cosecha de referencia (HIo): El valor del HIo se selecciona como el extremo medio de los valores de HIo reportados para la mayoría de la especie o clase de cultivo determinado. Este valor se debe seleccionar cuidadosamente y no se debe modificar sin una razón justificada, porque un cambio en el HIo exigiría la recalibración de los parámetros que modulan los efectos del estrés hídrico en el HI.

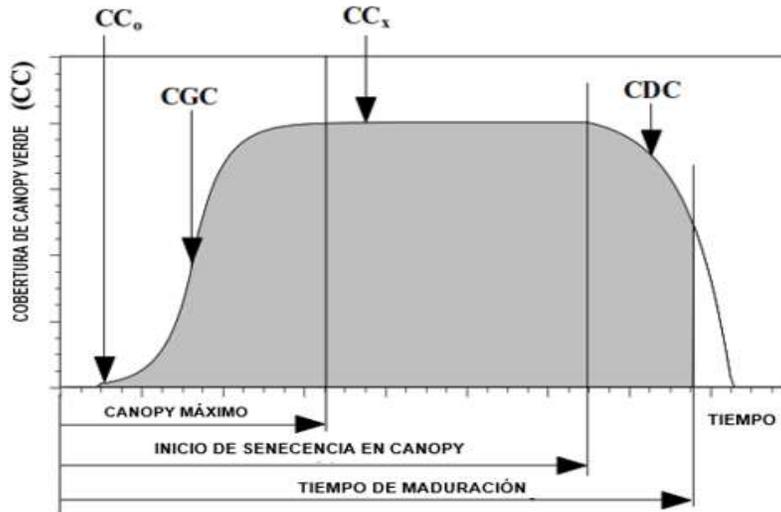


Figura 6: Comportamiento de la cobertura del dosel en el ciclo del cultivo

Nota: Nombres de las etapas de la curva de la cobertura de dosel verde. Fuente: Raes *et al.* (2012)

2.3.2. Estrés térmico del modelo Aquacrop

El modelo agrometeorológico AquaCrop simula los efectos del estrés por temperatura a través de un coeficiente de estrés térmico, que varían de cero a uno, que son funciones de la temperatura del aire o de los GDD. El valor de los GDD para un día determinado puede ser considerado como una medida integrada de la temperatura diaria. Los umbrales superior e inferior delimitan el rango de temperatura dentro del cual se puede empezar a contabilizar los GDD del día. A falta de datos más determinantes actualmente, la forma de la curva del estrés térmico (K_s) versus temperatura (Figura 7) se considera como holística, y se puede cambiar en el futuro cuando se disponga de mayor información (Raes *et al.*, 2012).

El estrés térmico por temperaturas bajas se manifiesta a través de un coeficiente de estrés térmico que afecta directamente a la transpiración de la planta como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$B = WP * \sum Tr \quad Tr = Ks * Kc * ET_0$$

Donde:

- B es la biomasa acumulada producida (kgm^{-2}),
- Tr es la transpiración del cultivo (en mm o m^3 por unidad de superficie) en el periodo que se cuantifica la biomasa producida
- WP es el parámetro de productividad del agua (kg de biomasa por m^2 por mm, o kg de biomasa por m^3 de agua transpirada).
- Kc es el coeficiente del cultivo que se emplea para hallar la tasa de transpiración.
- ETo es la evapotranspiración de la planta por factores netamente climáticos.
- Ks es el coeficiente de estrés de la planta de índole térmico, hídrico, etc.

Un efecto importante del estrés por temperatura ocurre en la polinización, que inhibe este proceso a temperaturas demasiado altas o muy bajas. La Figura 7 ilustra la curva del $K_{\text{Spol, cold}}$ para estrés por frío en la polinización, con la temperatura mínima diaria (T_n) como la variable independiente y el umbral superior establecido en un umbral de temperatura específico ($T_{n, \text{cold}}$) y el umbral inferior a 5°C por debajo de la $T_{n, \text{cold}}$. En el caso de estrés por frío la polinización empieza a inhibirse cuando la T_n cae por debajo del umbral superior y $K_{\text{Spol, c}}$ cae por debajo de 1. La polinización sigue disminuyendo a medida que la T_n y el $K_{\text{Spol, c}}$ disminuyen, y se detiene ($K_{\text{Spol, c}} = 0$) en el umbral inferior de la T_n o por debajo.

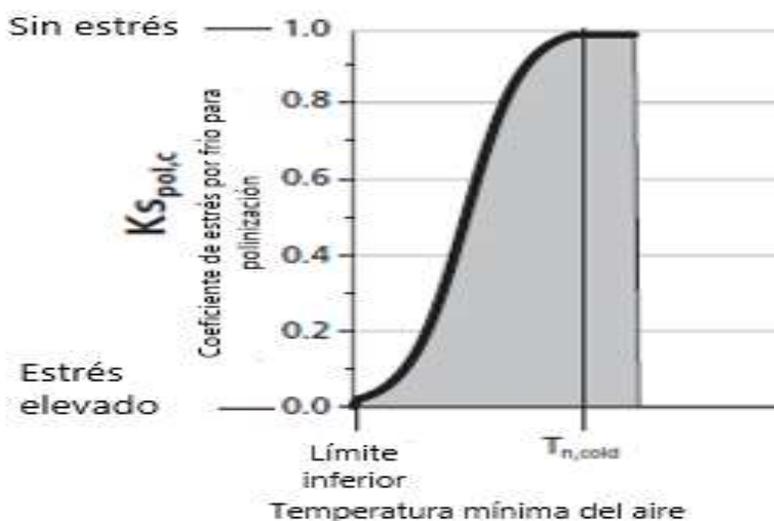


Figura 7: Comportamiento de la curva de estrés por temperatura fría ($K_{\text{Spol,c}}$)

Nota: La polinización es la etapa más sensible del estrés térmico. Fuente: Raes et al., (2012).

El gráfico de la curva de estrés por calor que se muestra en la Figura 8, $K_{S_{pol,heat}}$ para estrés por calor en la polinización, con la temperatura máxima diaria (T_x) como la variable independiente y el umbral inferior establecido en un umbral de temperatura específico ($T_{x,heat}$) y el umbral superior a 5 °C por encima de la $T_{x,heat}$. Homólogamente al estrés por frío, la polinización empieza a inhibirse debido al estrés por calor cuando la temperatura alcanza al umbral superior y $K_{spol,h}$ cae por debajo de 1. La actividad de polinización sigue disminuyendo a medida que la T_x aumenta y el $K_{spol,h}$ disminuyen, y se detiene ($K_{spol,h} = 0$) en el máximo del umbral superior y la polinización se detiene. El efecto definitivo de los estreses por temperatura en la polinización ocurre en el HI (Raes *et al.*, 2012).

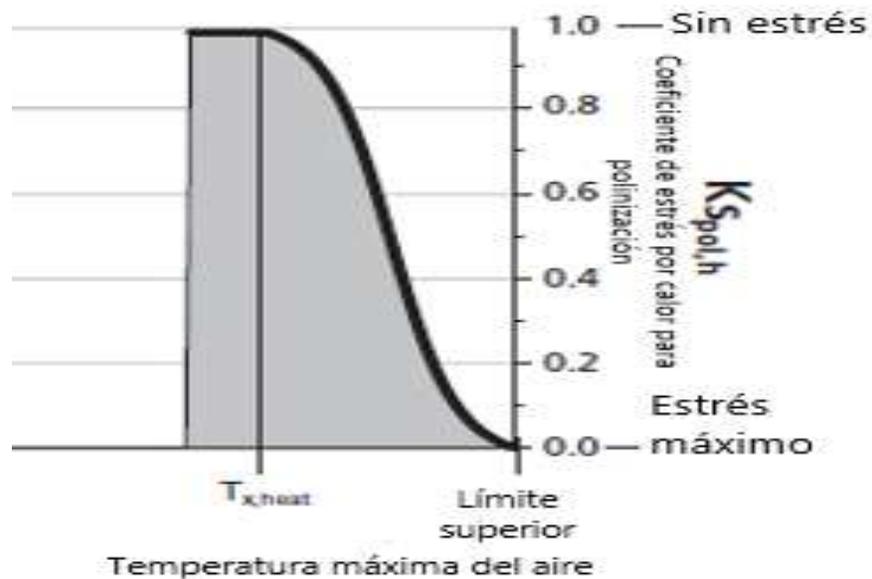


Figura 8: Comportamiento de la curva de estrés por temperatura caliente ($K_{S_{pol,h}}$)

Nota: La polinización es la etapa más sensible del estrés térmico. Fuente: Raes *et al.*, (2012).

III. METODOLOGÍA

3.1. Zona de estudio

La investigación se realizó en los campos del “Área Experimental de Riego (AER)” de la Universidad Nacional Agraria La Molina, ubicada en el distrito La Molina, provincia y departamento de Lima, con centro de gravedad en las coordenadas 288199 N, 8664039 E y representada en forma tridimensional en la Figura 9.



Figura 9: Vista tridimensional del Área Experimental de Riego (AER)

Nota: zona donde se realizó la investigación del cultivo de arroz bajo riego por goteo.

El área de investigación está dividida en dieciséis parcelas con sus respectivas instalaciones hidráulicas para el correcto funcionamiento del sistema presurizado. El canal que discurre a lo

largo de la parcela alimenta al pozo que permite el suministro de agua para el funcionamiento del riego. En la Figura 10 se observa los detalles físicos que integran el campo de estudio.



Figura 10: Esquema de la distribución de la zona de investigación

Nota. Campo experimental AER de la Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM).

A continuación, se describen las características de las parcelas, donde cada una de ellas tiene las dimensiones de 5,00 m x 2,50 m, están configuradas como se muestran en la Tabla 5:

Tabla 5: Características de las parcelas del AER

Detalle	Dimensiones
Área total (m ²)	250,00
Número de parcelas	16,00
Área de cada parcela (m ²)	12,50
Nº de líneas por parcela	10,00
Longitud de cada línea (m)	5,00
Distancia entre líneas (m)	0,25
Distancia entre plantas (m)	0,25

3.1.1. Agua y suelo

Para la presente investigación, se derivaron las aguas del canal que abastece a los cultivos de la Universidad Nacional Agraria La Molina. El análisis del agua se realizó en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes perteneciente a la Facultad de Agronomía y mostró los siguientes resultados: una conductividad eléctrica de $0,93 \text{ dSm}^{-1}$, pH o grado de acidez del agua es 7,90 (que cumple con el ECA para riego), que establece que el pH normal para uso en riego es de 6,50 – 8,40, cationes y aniones como se visualiza en el diagrama de Stiff en la Figura 11. En conclusión, el agua del canal de riego de la UNALM corresponde al tipo C2-S1 (salinidad moderada – poco sodio), lo cual indica que el agua es apta para cualquier tipo de suelo y cultivo como se puede corroborar en la Figura 23.

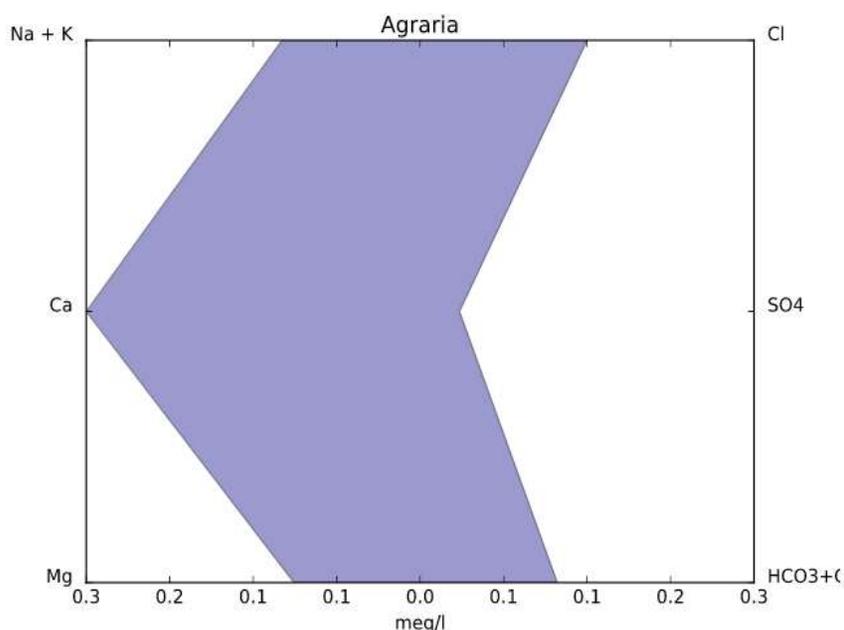


Figura 11: Diagrama de la caracterización del agua

Nota: Representación de la calidad del agua y grado de mineralización.

Las sales iniciales del suelo, se lavaron con aproximadamente 1000 m^3 de agua aproximadamente y se procedió a voltear el suelo con el tractor de la universidad. El análisis del suelo se realizó en el laboratorio de Riegos de la Universidad Nacional Agraria La Molina, obteniéndose como resultados los siguientes aspectos: un suelo franco arenoso, punto de marchitez permanente (13,10 %), punto de capacidad de campo (23,30 %), punto de saturación (41,90 %), conductividad eléctrica, cationes y aniones solubles entre otros parámetros.

3.1.2. Clima

Se empleó la información recopilada de la estación meteorológica Davis pro Vantage 2 instalada en el campo, los datos utilizados fueron la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (%), velocidad del viento (ms^{-1}), radiación solar ($\text{MJdía}^{-1}\text{m}^{-2}$) y precipitación (mm); posteriormente se hicieron los cálculos para la obtención de la evapotranspiración (ETo) por el método de Penman Monteith como se muestran en la Figura 12.

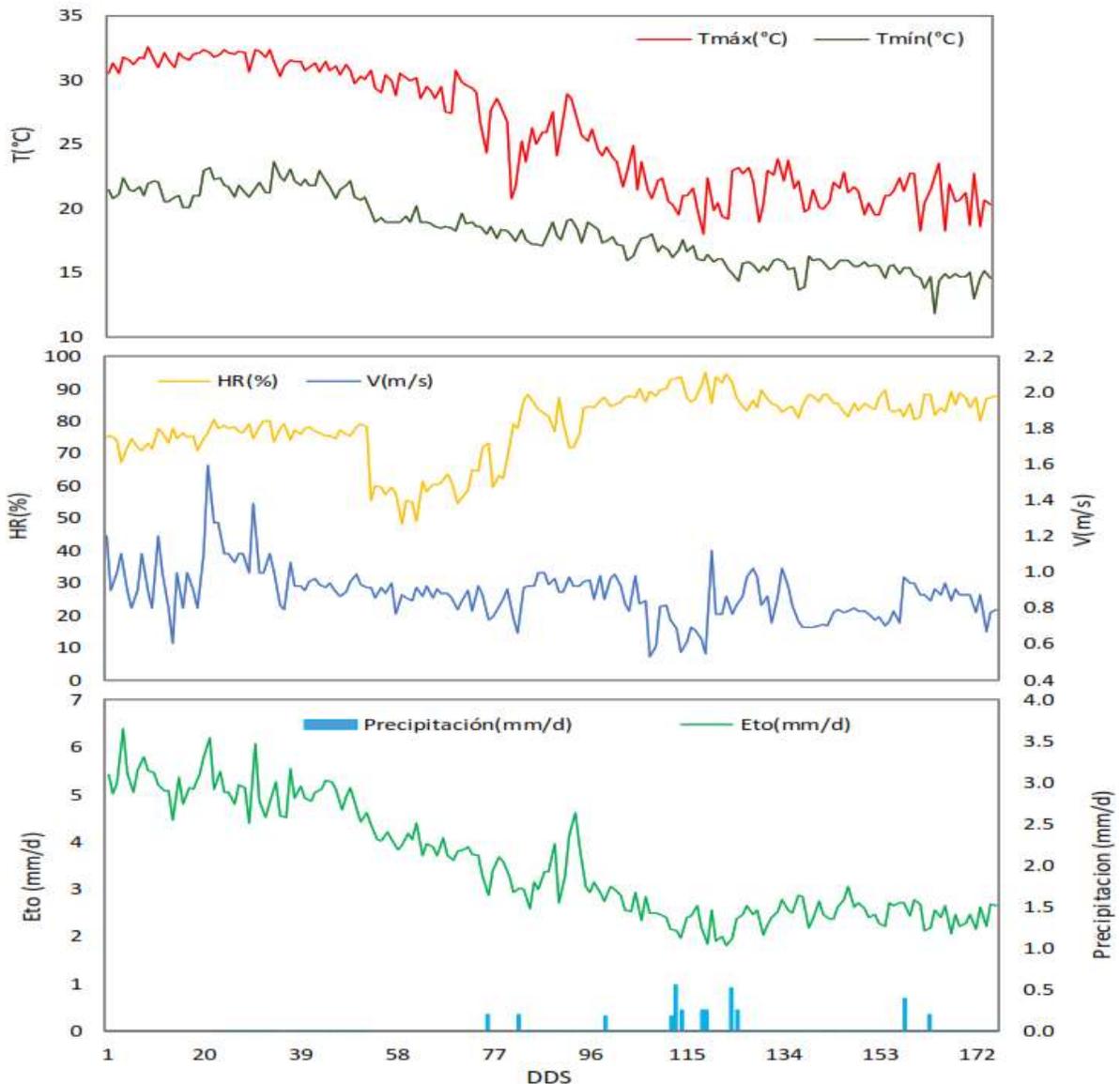


Figura 12: Datos colectados de la estación meteorológica

Nota: Variación diaria de la temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$), temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (%), velocidad del viento (m s^{-1}), precipitación (mm d^{-1}) y evapotranspiración (mm d^{-1}).

3.2. Materiales, equipos y herramientas computacionales

3.2.1. Material genético

El material genético que se empleó fue la variedad IR – 43, el cual es del tipo C3 que muestra las siguientes cualidades como: baja tasa de evapotranspiración, resistencia al estrés hídrico, tolerancia al estrés salino, entre otros. En el caso específico del arroz es susceptible a bajas temperaturas, alto número de macollos por planta, resistencia de tumbado de grano del macollo, para mayor información ver Tabla 6.

Tabla 6: Características de la variedad de arroz

Ítem	Descripción
Nombre Comercial	NIR-1
Nombre de la variedad	IR-43
País de origen	Filipinas
Sistema de cultivo	Siembra directa–Trasplante
Periodo vegetativo	140 días aproximado
Altura de planta	80 – 90 cm
Número de macollos	32 a 42 por golpe
Resistencia al tumbado	Resistente
Resistencia al desgrane	Moderado
Rendimiento potencial	12 – 14 t _{ha} ⁻¹
Largo de panoja	24,30 cm prom.
Largo del grano de cáscara	10,28 mm
Ancho del grano de cáscara	2,36 mm

Fuente: Chaudhary et al., (2003)

En la investigación el sistema de cultivo fue por siembra directa, por cada golpe se colocó 3 semillas para posteriormente realizar el deshije, el espaciamiento entre los golpes fue de 0,25 m y entre hileras de 0,25 m.

3.2.2. Equipos, herramientas y otros materiales

Se utilizaron diferentes equipos instalados en la parcela junto al cultivo y otros que se usaron al momento de la evaluación y toma de datos. En la Tabla 7 se detalla la relación de equipos.

Tabla 7: Equipos usados en la investigación

Equipos		Descripción
Medidor de humedad (Reflectometría en el Dominio de Frecuencias – FDR)		Toma de lecturas en un intervalo de tiempo configurado, en nuestro caso cada 30 min, humedad del suelo volumétrico.
Conductivímetro		Dispositivo diseñado para medir la resistencia de los materiales al paso de la electricidad, que es la conductividad.
Cámara fotográfica		Equipo diseñado para retratar de forma digital el crecimiento de las plantas a lo largo del periodo vegetativo.
Estación meteorológica		Estación convencional Davis Vantage equipada para medir la temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación, humedad relativa entre otras.

En la Tabla 8 se indican los programas computacionales que se emplearon durante el procesamiento de las fotografías obtenidas a lo largo de las etapas fenológicas del cultivo.

Tabla 8: Herramientas computacionales empleadas en la investigación

Herramientas Computacionales		Descripción
Programa Agrometeorológico AquaCrop		Sirve para simular el rendimiento del cultivo en el periodo de la campaña de estudio, apoyándose de datos de entrada y del estrés abiótico como la temperatura.
Procesador de imágenes Erdas Imagine		Se utilizó para el procesamiento de las fotos que cuantificaban la cobertura del dosel de las plantas en un tiempo determinado.
Programa de diseño AutoCad		Se utilizó para el procesamiento de las fotos que cuantificaban la cobertura del dosel de las plantas en un tiempo determinado.

3.3. Procedimiento

El procedimiento seguido en la presente investigación se agrupa según los ítems siguientes:

- (i) Recopilación y estimación de la información del clima, suelo, cultivo y agua de riego.
- (ii) Caracterización de la fenología, grados días de desarrollo (GDD), obtención del coeficiente de estrés térmico, rango de temperatura óptima para el crecimiento e identificación de parámetros del cultivo.

- (iii) Validación de los datos simulados con los observados a través de los indicadores de eficiencia del modelo.

Calibración del modelo Aquacrop para obtener parámetros fisiológicos y climáticos. En la Figura 13 se representa esquemáticamente el procedimiento seguido en el estudio con un diagrama de flujo.

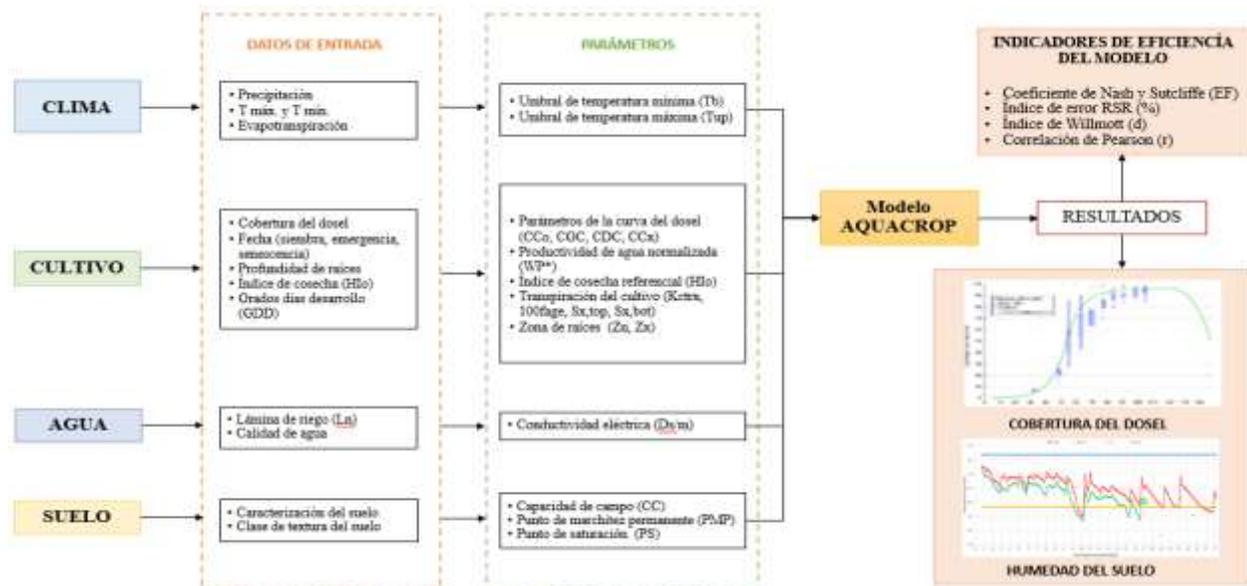


Figura 13: Procedimiento utilizado en la investigación

Se recopiló información de clima, suelo, cultivo y agua de riego durante el desarrollo del cultivo, a continuación, se describe secuencialmente el procedimiento seguido con la información recolectada.

3.3.1. Caracterización fenológica y grados días de desarrollo (GDD) del cultivo

La campaña de siembra de arroz NIR-43 se inició los primeros días de febrero del 2017, el campo de cultivo estuvo dividido en doce parcelas con sistema de riego a goteo, para el registro de las variables climáticas se contaban con equipos instalados in situ. Durante el crecimiento de los ejemplares se fertiliza, fumiga según el manejo de nutrientes establecido y se hace el seguimiento de los cambios de los rasgos fisiológicos para determinar las fases fenológicas. Se monitoreo el crecimiento de la cobertura dosel con una cámara, se eligieron 3 plantas al azar en la parte central de la parcela.

GDD es una unidad de medida que cuantifica la cantidad de energía que absorbe la planta durante el día, teniendo en cuenta un rango de temperatura donde la planta pueda desenvolverse fisiológicamente y seguir su crecimiento vegetativo. Para la obtención de esta unidad de medida, se tomaron en cuenta las fórmulas que se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9: Fórmulas para la obtención de los GDD

Etapa de crecimiento	Fórmula
Aparición	$S(t) = S(t - 1) + 0,25 * \left(\frac{T - Tb}{TU1}\right) \dots 1$
	$S(t) = S(t - 1) + 0 \dots 2$
Vegetativo	$S(t) = S(t - 1) + 0,25 * \left(\frac{T - Tb}{TU2}\right) \dots 1$
	$S(t) = S(t - 1) + 0 \dots 2$
Generativo	$S(t) = S(t - 1) + 0,25 * \left(\frac{T - Tb}{TU3}\right) \dots 1$
	$S(t) = S(t - 1) + 0 \dots 2$
Madurez	$S(t) = S(t - 1) + 0,25 * \left(\frac{T - Tb}{TU4}\right) \dots 1$
	$S(t) = S(t - 1) + 0 \dots 2$

Nota: S(t) GDD en un día t, S(t-1) GDD un día antes del día t, T temperatura del día t (°C), Tb temperatura basal del cultivo (°C), TU es la unidad térmica para etapa fenológica. Fuente: adaptado de Yuliawan, T. & Handoko, I. (2016).

Según Yuliawan, T. & Handoko, I. (2016) clasifican los estadios de arroz en cuatro grandes etapas, para fines de la investigación, se clasifican por etapas fenológicas basadas en sus características físicas y se tomaron una temperatura basal (Tb) única durante el periodo vegetativo como se puede mostrar en la siguiente Tabla 10.

Tabla 10: Fórmulas para la obtención de los GDD por fase fenológica

Etapa de crecimiento	Fórmula
Plántula	$S(t) = (T - Tb) \dots 1$ $GDD = S(t) + S(t + 1) + \dots + S(n)$ $t = 1, 2, \dots, n$
Macollamiento	$S(t) = (T - Tb) \dots 1$ $GDD = S(t) + S(t + 1) + \dots + S(n)$ $t = 1, 2, \dots, n$
Punto de Algodón	$S(t) = (T - Tb) \dots 1$ $GDD = S(t) + S(t + 1) + \dots + S(n)$ $t = 1, 2, \dots, n$
Desarrollo de panícula	$S(t) = (T - Tb) \dots 1$ $GDD = S(t) + S(t + 1) + \dots + S(n)$ $t = 1, 2, \dots, n$
Floración	$S(t) = (T - Tb) \dots 1$ $GDD = S(t) + S(t + 1) + \dots + S(n)$ $t = 1, 2, \dots, n$
Grano lechoso	$S(t) = (T - Tb) \dots 1$ $GDD = S(t) + S(t + 1) + \dots + S(n)$ $t = 1, 2, \dots, n$
Grano pastoso	$S(t) = (T - Tb) \dots 1$ $GDD = S(t) + S(t + 1) + \dots + S(n)$ $t = 1, 2, \dots, n$
Maduración	$S(t) = (T - Tb) \dots 1$ $GDD = S(t) + S(t + 1) + \dots + S(n)$ $t = 1, 2, \dots, n$

Nota: S(t) GDD en un día t, S(t) GDD un día antes del día t, T temperatura del día t (°C), Tb temperatura basal del cultivo (°C), n número de día.

a. Cobertura del dosel.

Para estimar la cobertura del dosel se realizaron los siguientes procedimientos:

- ✓ Se seleccionaron dos plantas en el centro de las cuatro parcelas experimentales y después se monitorearon la cobertura del dosel (CC) a lo largo del periodo del cultivo.
- ✓ Se preparó un marco de madera enmallado de 50 cm x 50 cm, con cuadrículas de 1 cm x 1 cm y se colocó el marco de manera de modo que abarque la superficie de la planta seleccionada, luego se procedió a tomar la fotografía. Se utilizó el marco de madera hasta la finalización de la etapa vegetativa como se muestra en la Figura 14.
- ✓ A partir de la etapa reproductiva y maduración se utilizó un calibrador con un área de 11 cm x 18 cm, plástico con dimensiones necesarias para diferenciar la planta seleccionada de las demás de la parcela, luego se procedió a tomar la fotografía para el procesamiento respectivo.
- ✓ Durante la etapa vegetativa se procedió a utilizar el software AutoCAD, escalando a través del marco de madera y delimitando el perímetro de la planta para posteriormente hallar el área.

- ✓ En la etapa adulta se utilizó el calibrador para procesar la fotografía con el software Erdas Imagine, el cual se usó el algoritmo de clasificación determinada para hallar el área de la planta.
- ✓ La determinación de la cobertura del dosel (CC) estuvo basada por la relación entre el área cubierta por las hojas y el área total de referencia (donde el área total de referencia fue el distanciamiento entre plantas 25 cm y entre líneas 25 cm).
- ✓ Finalmente, la curva de la cobertura del dosel se determinó con las muestras recogidas de campo, las cuales fueron comparadas con la curva de la cobertura del dosel simulada por el modelo agrometeorológico AquaCrop.

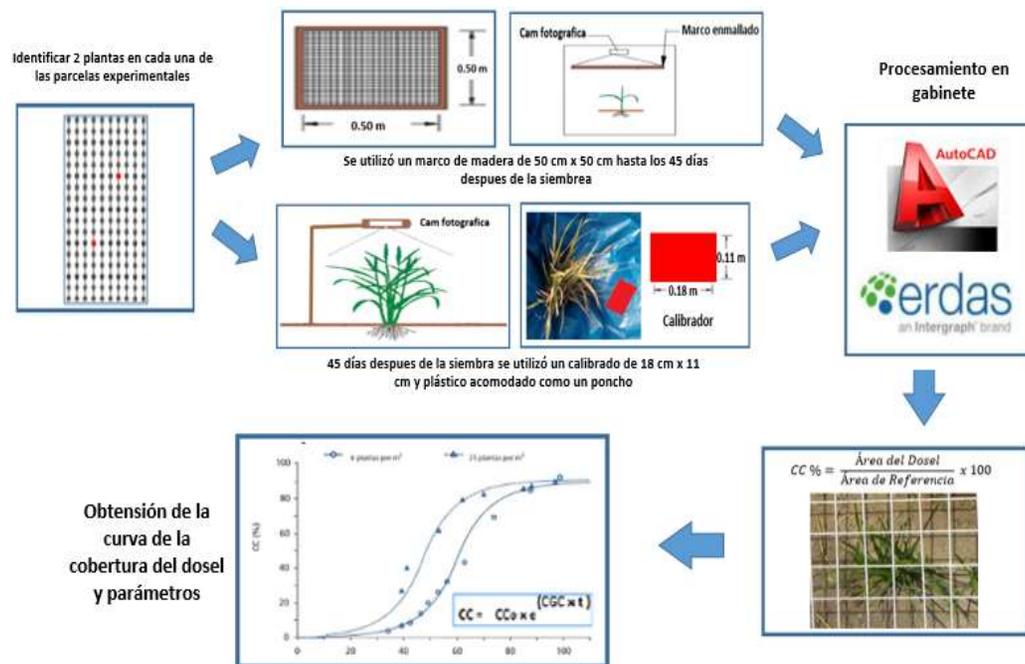


Figura 14: Proceso para la obtención de la cobertura del dosel

b. Contenido de humedad volumétrica del suelo.

La estimación de la humedad volumétrica del suelo, se obtuvo a partir de los equipos de TDR y FDR con colector de datos en tiempo real (Datalogger), utilizando sensores que miden la capacitancia eléctrica del suelo para medir la humedad volumétrica, se realizó los siguientes pasos:

- ✓ Para la medición con el equipo TDR, se seleccionó el lugar donde se ubicaban los especímenes elegidos aleatoriamente. Para ello, se incrusta las varillas de metal que posee el equipo para realizar la lectura adecuada.
- ✓ Para la medición con el equipo FDR, se seleccionaron dos parcelas de forma aleatoria para la instalación de los sensores del GS1.
- ✓ En las parcelas designadas, se instalaron cinco sensores GS1 a profundidades de 15 cm y 30 cm para realizar el monitoreo cerca de las raíces del cultivo como muestra en la Figura 15.



Figura 15: Proceso de recojo de datos de la humedad del suelo

- ✓ Una vez colocados los sensores, se procedió a la instalación del Datalogger para la colección de los datos arrojados por los sensores.
- ✓ Habiendo instalado el equipo de medición de humedad del suelo, se procedió a realizar la calibración de ambos equipos para obtener lecturas específicas y de mayor precisión para la configuración del suelo como se muestra en la Figura 25 (ANEXO 1).

b.1 Sistema de riego. Se empleó el sistema de riego por goteo, instalado en un campo de 1950 m², acondicionados en 16 parcelas (cada una de 12,5 m²) cintas de riego de 5 m con espaciamiento entre cintas de 0,25 m, emisores con separación de 0,30 m que aseguraban un área mojada de 75%.

El riego se automatizó mediante el dispositivo electrónico conectado a los arcos de riego con frecuencia de riego diaria para mantener la humedad del suelo entre capacidad de campo y saturación como muestra el registro de las láminas de riego con sus fechas, ver Tabla 19 (ANEXO 5). En la Figura 30 (ANEXO 7) se aprecia los diferentes elementos que integran el sistema de riego, ubicados funcionalmente según el requerimiento del cultivo y características afines al estudio.

c. Biomasa, rendimiento del cultivo, profundidad de raíz.

A continuación, se describen los procedimientos realizados para determinar cada uno de los parámetros, en las parcelas que se asignaron para la investigación, en cada una de ellas se seleccionó una planta al azar:

c.1. La estimación de la biomasa

- ✓ Se procedió a retirar cuidadosamente de las raíces y tallos, los restos de tierra; obteniendo una muestra libre de impurezas, reduciendo la posibilidad de afectar el resultado del peso final.
- ✓ Se realizó el pesaje de la planta recién extraída de la parcela (peso húmedo), punto base para el siguiente proceso.
- ✓ Posteriormente, se colocó la planta en el horno por un día a 110 °C para el respectivo secado; luego se retiró la planta del horno y se volvió a pesar (peso seco).
- ✓ Finalmente, se realizaron los cálculos para determinar el rendimiento.

c.2. La estimación de profundidad de raíces

- ✓ Al momento de extraer la planta del terreno, se delimitó una altura de profundidad de 0,50 m, asegurando no afectar la raíz principal o raíces principales, la planta con el cubo de tierra fue trasladada a una mesa de trabajo.
- ✓ Se utilizó agua para romper la cohesión de la tierra que rodeaba a la raíz, dejándola libre de impureza.
- ✓ Seguidamente, se desenredó la raíz principal y se colocó en un lugar limpio y seco para su cuantificación.
- ✓ Por último, se realizaron las mediciones de la longitud de la raíz de la planta.

c.3. La estimación del rendimiento del cultivo

- ✓ Realizada la cosecha, se trasladaron las panículas cuidadosamente a un área de la oficina de AER para la contabilización de granos.
- ✓ Se extrajeron de la panícula, grano por grano, segregándolos en grupos de granos vanos y los granos llenos.
- ✓ En cada uno de los grupos se determinó el número de integrantes en base al procedimiento de conteo por unidad.
- ✓ Posteriormente, se realizaron los cálculos matemáticos para determinar el rendimiento del cultivo.

En la Tabla 11 se muestra la fertilización (N-P-K) y el resumen de las actividades realizadas en la campaña del cultivo, considerando las fechas y los días después de la siembra(DDS).

Tabla 11: Calendario agrícola de la campaña del cultivo

Día	Mes	Año	DDS	Actividades
20	Ene	2017	-20	Riego de machaco
30	Ene	2017	-6	Volteo y lavado del suelo
31	Ene	2017	-5	Arado de terreno
5	Feb	2017	-3	Rastrillado y nivelación del terreno manualmente
8	Feb	2017	1	Siembra en seco
8	Feb	2017	1	Inicio de riego
9	Feb	2017	2	Deshierbo
13	Feb	2017	5	Emergencia del cultivo
17	Feb	2017	9	Inicio de medición de humedad con TDR
21	Feb	2017	13	Primera evaluación de cobertura del dosel del cultivo
27	Feb	2017	20	Deshierbo
3	Mar	2017	24	Fumigación del cultivo con foliar haciendo BUMA
6	Mar	2017	27	Inicio de macollamiento (fertilización 60-60-60)
7	Mar	2017	28	Segunda evaluación de cobertura del dosel del cultivo
13	Mar	2017	34	Instalación de la estación meteorológica
15	Mar	2017	36	Cambio de tuberías principales y secundarias
17	Mar	2017	38	Instalación de arcos de riego
29	Mar	2017	49	Instalación de FDR (reflectometría en el dominio de frecuencia) en campo
31	Mar	2017	51	Muestreo de suelo, método del cilindro para el cálculo de densidad
5	May	2017	86	Inicio de punto de algodón. Tercera evaluación de cobertura del dosel

12	May	2017	93	Observación de la primera panícula en campo
15	May	2017	96	Fumigación del cultivo con foliar haciendo BUMA.
25	May	2017	106	Instalación de plástico azul en bordes de cada parcela, y plástico blanco movable en la parte superior de la parcela: para proteger del frío.
27	May	2017	108	Aplicación de agroquímicos (protix, agry ben duo, benlate, silicon AG), haciendo el BUMA
30	May	2017	111	Conteo de panículas en campo
31	May	2017	112	Cuarta evaluación de cobertura del dosel
6	Jun	2017	118	Quinta evaluación de cobertura del dosel
7	Jun	2017	119	Inicio de floración. Fertilización 60-0-0
12	Jun	2017	124	Aplicación de Azoo Duo, con buen uso de manejo agroquímicos (BUMA)
16	Jun	2017	128	Conteo de número de macollos y altura de planta.
20	Jun	2017	132	Sexta evaluación de cobertura del dosel
4	Jul	2017	145	Séptima evaluación de cobertura del dosel
14	Jul	2017	156	Octava evaluación de cobertura del dosel
21	Jul	2017	163	Novena evaluación de cobertura del dosel
1	Ago	2017	174	Evaluación de porcentaje de humedad de grano
2	Ago	2017	175	Inicio de cosecha del cultivo
2	Ago	2017	175	Décima evaluación de cobertura del dosel

La información colectada en campo y procesada se ingresó al modelo Aquacrop.

3.3.2. Estimación del coeficiente de estrés térmico del cultivo

Este coeficiente, se presentó a lo largo de la campaña del cultivo, pero tiene una mayor incidencia en la etapa reproductiva donde los órganos reproductores de la planta son sensibles a variaciones de temperatura afectando directamente en la producción de granos fértiles. El coeficiente de estrés térmico ($K_{spol,c}$) tiene un valor de cero cuando el estrés térmico es máximo y tiene un valor de 1 cuando la planta no presenta estrés por temperatura como se muestra en la siguiente Figura 16.

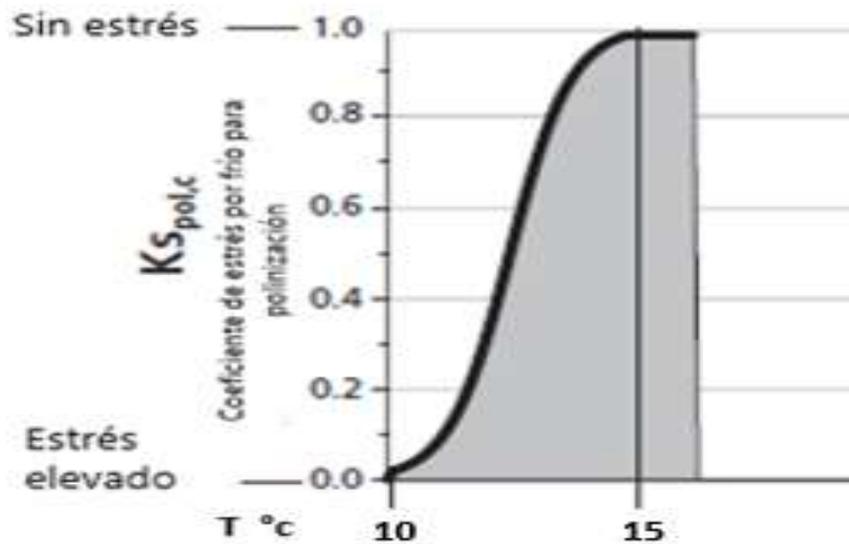


Figura 16: Comportamiento del coeficiente de estrés por temperatura (Ks) por frío

Fuente: Raes et al., (2012)

La determinación del grado de afectación en la fase fenológica de floración, etapa más vulnerable según Yoshida, (1981), se consideró el registro diario de las temperaturas máxima (°C), temperaturas mínimas (°C), la evapotranspiración (ETo), para cotejar la respuesta de la planta a través del porcentaje de granos vanos, porcentaje de granos llenos, rendimiento del cultivo y producción de biomasa.

3.3.3. Calibración del modelo Aquacrop

a. Identificación de parámetros del modelo Aquacrop.

El modelo utiliza dos tipos de parámetros, el primer grupo son los parámetros conservativos, cuya variabilidad debe ser mínima o nula en el tiempo, en el manejo del cultivo o la localización; otro grupo de parámetros llamados no conservativos, que varían según los días después de la siembra del cultivo. En la Tabla 12, para una mejor visualización, se presentan los parámetros utilizados en el modelamiento.

Tabla 12: Parámetros conservativos del modelo agrometeorológico AquaCrop

Descripción	Símbolo	Tipo ^{(1), (2), (3), (4)}	Valor/rangos (FAO)
Fenología del cultivo			
Umbrales de temperatura del aire			
Temperatura base	T _{base}	Conservativo ⁽¹⁾	13,00
Temperatura superior	T _{upper}	Conservativo ⁽¹⁾	30,00
Desarrollo del dosel del cultivo			
Superficie del suelo cubierto por una plántula (cm ² /planta).	cc _o	Conservativo ⁽²⁾	3,00 – 8,00
Número de plantas por hectárea.	-	Manejo ⁽³⁾	300000 – 1500000
Tiempo desde el trasplante hasta la recuperación (GDD).	-	Manejo ⁽³⁾	35 – 100
Coefficiente de crecimiento del dosel (fracción por GDD).	CGC	Conservativo ⁽¹⁾	0,006 – 0,008
Cobertura máxima del dosel (%).	CC _X	Manejo ⁽³⁾	Casi cubierto
Tiempo desde el trasplante hasta el inicio de la senescencia (grado día de desarrollo).	-	Cultivo ⁽⁴⁾	1000 – 1500
Coefficiente de disminución del dosel (fracción por grado día de desarrollo).	CDC	Conservativo ⁽¹⁾	0,005
Duración del ciclo de cultivo (GDD).	-	Cultivo ⁽⁴⁾	1500 – 2000
Floración			
GDD hasta la floración	-	Cultivo ⁽⁴⁾	1000 – 1300
Duración de la fase de la floración (GGD).	-	Cultivo ⁽⁴⁾	300 – 400
Determinación del cultivo en relación con la floración.	-	Conservativo ⁽¹⁾	Si
Desarrollo de la zona de la raíz			
Profundidad mínima de enraizamiento.	Zn	Manejo ⁽³⁾	0,30
Profundidad máxima de enraizamiento.	Zx	Manejo ⁽³⁾	Hasta 0,60
Factor de expansión de la zona de la raíz.	-	Conservativo ⁽¹⁾	2,00 – 3,00
Transpiración del cultivo			
Coefficiente de cultivo cuando el dosel está completo, pero antes de la senescencia.	Kc _{Tr,x}	Conservativo ⁽¹⁾	1,10
Descenso del coeficiente de cultivo (% día) como consecuencia del envejecimiento, etc.	-	Conservativo ⁽¹⁾	0,15
Efecto de la cobertura del dosel en la reducción de la evaporación del suelo en la etapa tardía de la temporada.	-	Conservativo ⁽¹⁾	50,00
Producción de biomasa y formación de rendimiento			
Productividad de agua de cultivo			
Productividad del agua normalizada (gr/m ²)	WP*	Conservativo ⁽¹⁾	19,00
Productividad del agua normalizada durante la formación del rendimiento (como % WP * antes de la formación del rendimiento).	-	Conservativo ⁽¹⁾	100
Índice de cosecha			
Índice de cosecha de referencia (%).	HI _o	Cultivo ⁽⁴⁾	35 – 50
Posible aumento (%) de HI debido al estrés hídrico antes de la floración.	-	Conservativo ⁽¹⁾	Ninguno
Exceso de frutos potenciales (%).	-	Conservativo ⁽²⁾	Alto
Coefficiente que describe el impacto positivo del crecimiento vegetativo restringido durante la formación del rendimiento en HI.	-	Conservativo ⁽¹⁾	Bajo
Coefficiente que describe el impacto negativo del cierre de estomas durante la formación de rendimiento en HI.	-	Conservativo ⁽¹⁾	Moderado
Aumento máximo permitido (%) del HI especificado.	-	Conservativo ⁽¹⁾	15
Estrés			
Estrés por temperatura del aire			
Tmín del aire por debajo de la cual la polinización comienza a fallar (° C).	-	Conservativo ⁽¹⁾	8,00
Tmáx del aire por encima de la cual la polinización comienza a fallar (° C).	-	Conservativo ⁽¹⁾	35,00
GDD para la producción total de biomasa.	-	Conservativo ⁽¹⁾	10,00 (estimado)

Fuente: Elaborado a partir de Raes et al., (2017).

b. Calibración del modelo Aquacrop

El proceso de calibración es iterativo, implica ensayo y error para llegar a una diferencia mínima entre la información simulada y los valores observados durante el período experimental de los ensayos.

Cobertura del dosel

La estimación de la curva de la cobertura del dosel (CC), implicó la recogida de datos en campo, permitiendo el cálculo de los siguientes valores de la cobertura del dosel inicial (CCo), la cobertura máxima del dosel (CCx), coeficiente de crecimiento del dosel (CGC), coeficiente de disminución del dosel (CDC), según Steduto *et al.*, (2012).

Humedad del suelo

La humedad del suelo fue recogida por los sensores GS1 a lo largo de la campaña, realizando un monitoreo continuo para detectar los datos incompletos e inexactos, asegurando la calidad de los datos a procesar.

En relación al desempeño del coeficiente máximo de transpiración del cultivo ($K_{cTr,x}$) y la incidencia del estrés hídrico (la senescencia del dosel y umbrales de agotamiento del agua del suelo que limita la expansión de la cubierta) se concordaron a los datos obtenidos en el campo de investigación.

El parámetro de productividad de agua (WP) y la producción de biomasa se calibró colocando valores obtenidos del cultivo, de esta forma se asegura que las proyecciones que se generan en Aquacrop reflejan los resultados indicados.

El proceso de la validación de la información colectada en campo y a la luz del marco conceptual, permite contar con información de calidad, datos consecutivos, libre de errores, entre otros, que son insumos claves en la calibración de los parámetros del modelo utilizando diversos indicadores estadísticos (Raes *et al.*, 2012).

c. Criterio de evaluación de eficiencia del modelo

El grado de aceptación del modelo se determinó según parámetros estadísticos como el coeficiente de eficiencia (EF) del modelo Nash-Sutcliffe, el índice de error RSR, índice de concordancia de Willmott (d) y el coeficiente de correlación r de Pearson, según la Tabla 13.

Tabla 13: Indicadores estadísticos a evaluación de la eficiencia del modelo

Indicador	Valor	Calificación de desempeño
Coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (EF) $EF = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{men})^2} \right]$	$0,75 \leq NSE < 1,00$ $0,65 \leq NSE < 0,75$ $0,50 \leq NSE < 0,65$ $0,40 \leq NSE < 0,50$ $-\alpha < NSE < 0,40$	Muy bueno Bueno Satisfactorio Aceptable Insatisfactorio
RSR, es la relación entre el RMSE y la desviación estándar de las observaciones. $RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \left[\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{men})^2}} \right]$	$0,00 < RSR \leq 0,50$ $0,50 < RSR \leq 0,60$ $0,60 < RSR \leq 0,70$ $0,70 < RSR < +\alpha$	Muy bueno Bueno Satisfactorio Insatisfactorio
El índice de Willmott (d) $d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_i^{men} + Y_i^{obs} - Y_i^{men})^2} \right]$	Rango $-\alpha < d \leq 1$ $d = 1$ $d = 0$	Perfecto acuerdo No hay acuerdo
Coeficiente de correlación de Pearson (r) $r = \left[\frac{\sum_{i=1}^n Y_i^{obs} Y_i^{sim} - \frac{\sum_{i=1}^n Y_i^{obs} \sum_{i=1}^n Y_i^{sim}}{n}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n Y_i^{obs^2} - \frac{Y_i^{obs^2}}{N}} * \sqrt{\sum_{i=1}^n Y_i^{sim^2} - \frac{Y_i^{sim^2}}{N}}} \right]$	Rango $< -1, 1 >$	Significativo (Prueba Student) No significativo (Prueba Student)

Nota. Parámetros estadísticos para la evaluación de la eficiencia de la calibración del modelo. FUENTE: Moriasi *et al.*, (2007).

Dónde Y_i^{obs} son los datos observados, Y_i^{sim} son los datos simulados, Y_i^{mean} es el valor promedio observado, RMSE es el error cuadrático medio de los datos observados y simulados, STDEVobs es la desviación estándar de los datos observados, n el número de mediciones y N es el número total de observaciones

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La investigación realizada para evaluar el efecto de la temperatura del aire en los estados fenológicos del cultivo del arroz bajo riego por goteo empleando el modelo agrometeorológico Aquacrop obtuvo los siguientes resultados y discusión.

4.1. Caracterización fenológica y GDD del cultivo

En la Figura 17 se muestra la secuencia de crecimiento y duración del cultivo teniendo en cuenta las temperaturas máximas, promedio y mínimas suscitadas durante las fases fenológicas, notándose que las temperaturas basales estuvieron por encima de las temperaturas máximas, agudizando en la fase de floración y los GDD del cultivo a lo largo del periodo vegetativo del cultivo. Seguidamente, se describen las principales características fisiológicas mostradas por el cultivo:

- a. Germinación: Al emerger la semilla comenzó con la absorción de agua e intercambio gaseoso, con temperatura máxima de 31,80 °C y una mínima de 20,80 °C el cual obtuvo 56,65 GDD; terminó a los 5 DDS debido a las altas temperaturas.
- b. Plántula: Inicia desde la emergencia hasta el momento que la planta alcanzó el desarrollo de su quinta hoja, este proceso duró hasta los 26 DDS. El cultivo soportó una temperatura máxima de 32,60 °C y una mínima de 20,10 °C, añadiendo 245,55 GDD y con una radiación promedio de 210,29 w m⁻² en esta fase; el cultivo tuvo un crecimiento acelerado debido a las temperaturas altas, mostrando un buen establecimiento, teniendo un nivel positivo de respuesta contra las malezas y precocidad al momento de emerger las primeras hojas, validando lo expuesto por Alvarado y Hernaiz, (2007), los cultivos expuestos a temperaturas frescas (por debajo de 15,00 - 17,00 °C) pueden padecer lesiones graves, conduciendo a un mal establecimiento, disminución de la capacidad competitiva a la malezas y retraso en la maduración del cultivo.

- c. Macollamiento: Empieza a 27 DDS con el crecimiento de tallos secundarios de las yemas auxiliares que se encuentran en los nudos, estos tallos se denominan macollos y mientras van creciendo el tallo principal es difícil de diferenciar de los secundarios, se muestra un crecimiento muy activo ayudado con una temperatura máxima de 32,40 °C y mínima de 17,10 °C, agregando 583,15 GDD y con una radiación promedio de 163,08 w m⁻²; las plantas experimentaron un crecimiento rápido en el tallo y en las hojas, a causa de la precocidad las estructuras vegetales fueron blandas e inconsistentes, esto se suscitó por la altas temperaturas, esta tendencia posteriormente se fue inhibiendo a causa de la disminución de la temperatura ocasionado la extensión de la duración de la fase fenológica hasta los 86 DDS.
- d. Punto de algodón: La diferenciación del meristemo en el punto de crecimiento del tallo se registró hasta los 110 DDS, indica el inicio del primordio floral; la temperatura mínima registrada fue de 15,90 °C y una máxima de 28,90 °C, acumulando de 148,10 GDD y con una radiación promedio de 94,75 w m⁻² en esta fase; la panícula empezó a formarse en el tallo, ya que contaba con una longitud considerable para albergar, se visualizó el primordio floral por un periodo de diez días después de su iniciación. Teniendo en cuenta lo mencionado, este proceso indica el inicio a la etapa reproductiva en la planta del arroz, la formación de la panícula puede verse afectada si los órganos de la planta no se desarrollaron adecuadamente a causa de la precocidad producido por las alta temperaturas, no obstante, en esta nueva etapa los rangos de temperaturas optimas disminuyen y tienden a ser cálidas. Considerando lo manifestado, Yoshida (1981) mostró que las plantas de arroz tienen un umbral de temperatura más bajo (10,00 – 13,00 °C) por daño debido al frío durante las primeras etapas de desarrollo (germinación y vegetativo), mientras la temperatura umbral el daño es mayor (18,00 – 20,00 °C) en la etapa reproductiva.
- e. Desarrollo de panícula: la emergencia de la panícula se evidencia al observar el envejecimiento y muerte de las hojas basales; la temperatura máxima fue de 22,40 °C y mínima 16,00 °C, con una acumulación de 32,25 GDD, con una radiación promedio de 75,84 w m⁻² en esta fase e iniciándose a los 119 DDS; en esta fase la planta tiene una vulnerabilidad a bajas temperaturas, debido a la mínima acumulación de GDD el funcionamiento de los órganos reproductores masculinos de la planta no era el adecuado, generando polen estéril; por otro lado, las panículas tuvieron una longitud promedio de 20,10 cm y evidenciando un adelanto de la senescencia debido al comportamiento de las hojas.

f. Floración: la duración de la fase se redujo a doce días, culminando a los 131 DDS, la temperatura máxima fue de 23,10 °C y mínima 14,40 °C, una acumulación de 40,60 GDD y con una radiación promedio de 70,60 w m⁻² en esta fase; se evidenció el inicio de esta fase por la abertura de las espiguillas, se repitió por cuatro días y tuvo una duración de 45 a 60 minutos por consecuencia de la dehiscencia reducida debido a las bajas temperaturas. Finalmente, el polen proveniente de la antera fertiliza el óvulo que se encuentra en el estigma, dando como resultado la formación de semillas y una alta esterilidad de las espiguillas validando lo mencionado anteriormente por Satake y Hayase, (1976).

g.

DÍAS DESPUES DE LA SIEMBRA (DDS)									
ETAPA FENOLOGICA DDS	EMERGENCIA	PLANTULA	MACOLLAMIENTO	PUNTO DE ALGODÓN	DESARROLLO DE PANICULA	FLORACIÓN	GRANO LECHOSO	GRANO PASTOSO	MADURACIÓN
	0-5	6-26	27-86	87-110	111-119	120-131	132-145	146-158	159-175
									
T _{max} °C	31.80	32.60	32.40	28.90	22.40	23.10	23.90	22.80	23.50
T _{min} °C	20.80	20.10	17.10	15.90	16.00	14.40	13.60	14.50	11.80
GDD	56.65	302.20	885.35	1033.45	1065.70	1106.30	1155.55	1197.60	1247.35
GRADOS DÍAS DE DESARROLLO (GDD)									

Figura 17: Fases fenológicas del cultivo de arroz

Nota: Días después de la siembra, GDD y temperatura máxima y mínima del cultivo

Así mismo, nos menciona Jacobs y Pearson, (1994); Cruz et al., (2006) que la esterilidad de las espiguillas es el síntoma más común de lesión cuando las plantas de arroz experimentan temperaturas frías en la etapa reproductiva.

h. Grano lechoso: esta fase tuvo una duración de trece días, duró hasta los 144 DDS, la temperatura máxima fue de 23,90 °C y mínima 13,60 °C, acumulando 49,25 GDD y con una radiación promedio de 56,34 w m⁻² en esta fase; los granos fértiles empiezan a llenarse de un líquido blanco y de consistencia lechoso, puede apreciarse presionando con los dedos el

grano. En esta fase la senescencia muestra una mayor intensidad y con respecto a los granos se evidencia una alta tasa de esterilidad, pudiéndose diferenciar los granos vanos de los fértiles, las plantas de arroz sometidas a temperaturas medias por debajo de 20,00 °C durante tres días seguidos, altera el normal proceso de división de las células madre del polen, induciendo a un alto porcentaje de esterilidad de las espiguillas. Coincidiendo con lo publicado por Rashid y Yasmeen, (2017) que el daño es severo si prevalece por más de 5 a 6 días.

- i. Grano pastoso: la temperatura máxima fue de 22,80 °C, mínima 14,50 °C, con 42,05 GDD y con una radiación promedio de 49,22 w m⁻² en esta fase; la porción lechosa del grano fértil se transformaron primero en una masa suave que con el pasar de los días se fueron solidificando hasta 158 DDS, esta etapa se visualiza correctamente la proporción de los granos vanos y llenos de la panícula, estos empiezan a cambiar del color verde inicial a amarillo con temperaturas bajas con respecto a la temperatura ideal para el cultivo del arroz, la senescencia se visualiza en tallos y hojas inferiores que se vuelven amarillas.
- j. Grano duro: En esta etapa finaliza el ciclo de vida del cultivo que traducidos en días fueron 175 DDS, la temperatura máxima fue de 23,50 °C y mínima 11,80 °C, unos 37 días después de floración aproximadamente que alcanzo su madurez y con 49,75 GDD añadidos y con una radiación promedio de 41,62 w m⁻²; la panícula madura de arriba hacia abajo; generalmente los granos son de color amarillo, pero en nuestro caso tuvo una coloración marrón en las puntas debido a las bajas temperaturas que se presentaron, las hojas superiores se fueron secando paulatinamente y cerrándose debido a la senescencia generalizada del cultivo. La cosecha se llevó a cabo con un 14 por ciento de humedad en el grano.

En la Tabla 14 se resume de los GDD acumulados en las fases fenológicas identificadas del cultivo de arroz. Así como las temperaturas del aire medidas en campo, destacando en la fase de floración ($\bar{x} \pm S = 18,35 \pm 3,23$), con una temperatura mínima de 14,40 °C y un GDD parcial de 40,60. Las temperaturas en el rango de 15,00 a 19,00 °C perjudican el desarrollo de microesporas y producción de polen estéril, contribuyendo a la formación de granos estériles en las espiguillas (Satake y Hayase, 1976).

Tabla 14: GDD por fase fenológicas

Fase fenológica	DDS	T($\bar{x}\pm S$) (°C)	GDD parcial	GDD acumulado
Emergencia	0 – 5	26,33 \pm 5,12	56,65	56,65
Plántula	6 – 26	26,73 \pm 5,36	245,55	302,20
Macollamiento	27 – 86	24,64 \pm 5,17	583,15	885,35
Punto de algodón	87 – 110	21,10 \pm 3,80	148,10	1033,45
Desarrollo de panícula	111 – 119	18,55 \pm 2,20	32,25	1065,70
Floración	120 – 131	18,35 \pm 3,23	40,60	1106,30
Grano lechoso	132 – 145	18,50 \pm 3,26	49,25	1155,55
Grano pastoso	146 – 158	18,20 \pm 2,93	42,05	1197,60
Grano duro	159 – 175	17,73 \pm 3,47	49,75	1247,35

La esterilidad floral se mide con el porcentaje de granos vanos, y es proporcional al polen estéril generado por los estambres; esta anomalía es ocasionada por el coeficiente de estrés térmico por temperaturas bajas. Las bajas temperaturas provocan sacos embrionarios malformados que inhibe el desarrollo del polen y finalmente reduce la fertilidad de las espiguillas (Nagasawa et al., 1994). La evaluación del crecimiento y productividad del cultivo se basó en los siguientes indicadores agronómicos que se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15: Indicadores agronómicos en el cultivo de arroz

N° parcela	# panícula planta	# granos por panoja		% granos por panoja		Peso de mil granos	Rendimiento (gr planta ⁻¹)	Rendimiento (t ha ⁻¹)
		Vanos	Llenos	Vanos	Llenos			
1	35	66	12	84,62	15,38	17,0	7,00	1,10
2	22	53	14	78,79	21,21	17,0	5,20	0,80
3	25	86	12	87,76	12,24	16,9	5,10	0,80
4	44	82	9	90,11	9,89	17,2	6,70	1,10
5	28	67	8	89,33	10,67	17,1	3,80	0,60
6	37	71	3	95,95	4,05	17,3	1,90	0,30
7	31	92	4	95,83	4,17	16,9	2,10	0,30
8	41	59	4	93,65	6,35	17,0	2,80	0,40
9	12	76	6	92,68	7,32	16,9	1,20	0,20
10	9	74	20	78,72	21,28	16,8	2,90	0,50
11	14	60	7	89,55	10,45	17,1	1,60	0,30
12	15	86	4	95,56	4,44	17,0	1,00	0,20

El rendimiento de las parcelas fue de ($\bar{x}\pm S = 0.55\pm 0.33$) t ha⁻¹ y se encuentran en un rango de 0,20 a 1,10 t ha⁻¹, siendo una de las causas la velocidad y duración del llenado de grano; este último es afectado por el estrés por frío durante el desarrollo del grano produciendo resultados tardíos y parciales en la maduración del grano (Oliver et al., 2007). Teniendo en cuenta lo

mencionado se infiere que, el efecto del coeficiente de estrés térmico por temperaturas bajas que se suscitaron en la fase de floración, generó un alto índice de esterilidad en la producción de grano.

4.2 Estrés térmico

4.2.1 Estrés térmico del cultivo

En la Figura 18 se muestra la variación temporal de la temperatura del aire y los rangos de temperaturas óptimas para el desarrollo del cultivo. Como se observa, el desarrollo del cultivo hasta 70 DDS en fase de macollamiento, se desarrolló con condiciones óptimas de temperatura (temperatura máxima de 32,40 °C y una temperatura mínima 20,00 °C); sin embargo, en la fase de floración (120 DDS) la temperatura máxima fue de 19,45 °C y una temperatura mínima de 16,95 °C, generando estrés térmico, contribuyendo a la presencia de granos estériles. Cabe mencionar, durante la etapa vegetativa, acumulación excesiva de GDD puede ser una restricción severa mientras que, en la etapa reproductiva, el estrés por frío afecta a los órganos reproductores en formación a través, por ejemplo, abscisión floral, producción de polen estéril, explosión del tubo polínico, óvulos abortados, así como desarrollo abreviado de semillas como mencionan Kuroki, M., Saito, K., Matsuba, S., Yokogami, N., Shimisu, H., Ando, I., Sato, Y., (2007).

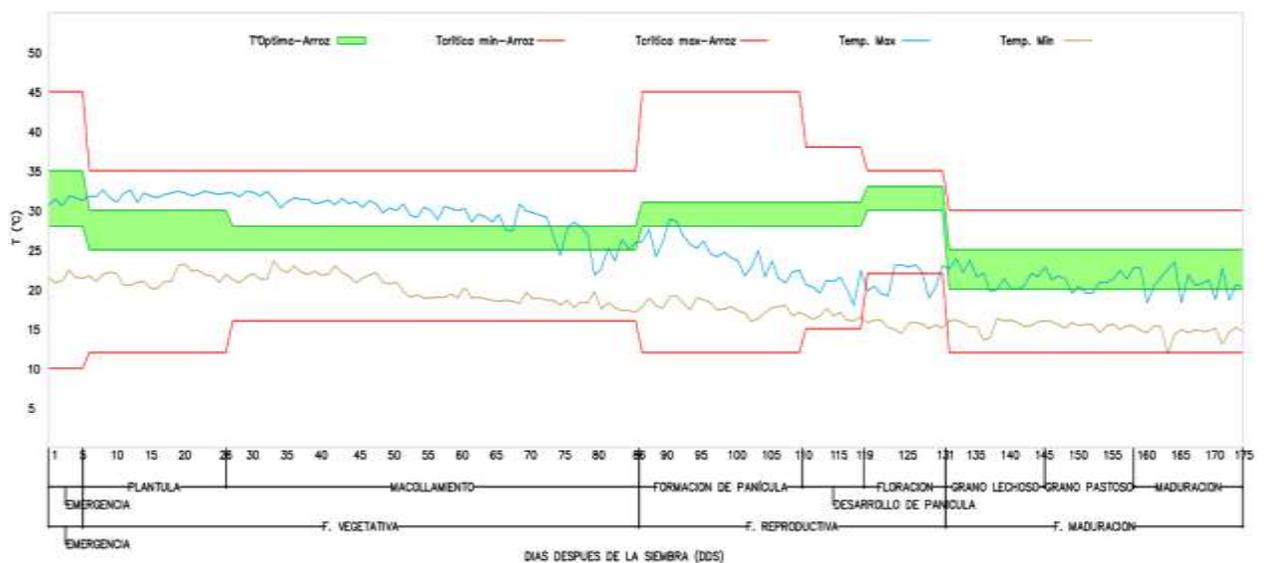


Figura 18: Variación y rangos de temperaturas de crecimiento óptimo

Nota: Variación de las temperaturas máximas, temperaturas mínimas y temperaturas medias durante el desarrollo del cultivo variedad IR-43 y temperaturas óptimas propuestas por Chaudhary *et al.*, (2003).

En la Figura 19 se presenta la variación del coeficiente de estrés térmico que influye en las actividades biológicas de la planta; en el que se destaca, el estrés por frío, y sus incidencias según la variación diaria de la temperatura. En la investigación se obtuvo una temperatura mínima de 15,00 °C, a partir del cual se afectó la transpiración del cultivo con un coeficiente igual a uno; en cuanto fue descendiendo la temperatura según sea el caso, el coeficiente también disminuyó hasta llegar a cero con una temperatura de 10,00 °C.

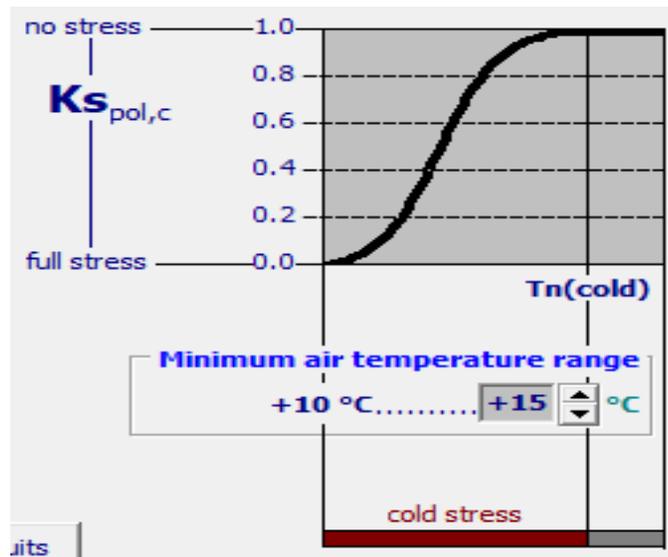


Figura 19: Curva de estrés térmico por frío en la polinización y según GDD.

Por otro lado, en la Figura 20 se muestra el porcentaje de reducción de la biomasa debido al estrés térmico; obteniendo una reducción que varía del 2 al 90 por ciento a lo largo de la campaña del cultivo. Al respecto Lee, (2001) menciona que el estrés por temperatura baja tiene incidencia en la producción de biomasa.

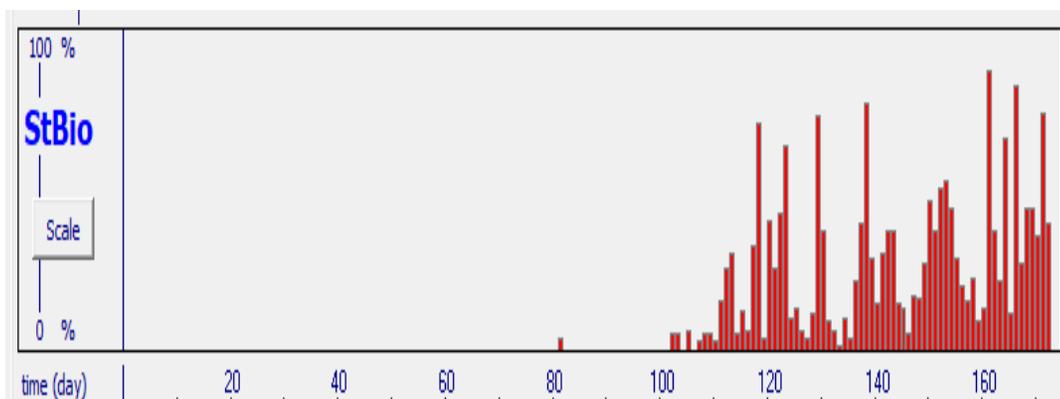


Figura 20: Porcentaje de reducción de la biomasa según estrés térmico (StBio)

Según la simulación del modelo, el estrés térmico disminuye la producción de la biomasa en un 12 por ciento mermando el desarrollo de la planta sistemáticamente a partir de la fase de floración, además se puede visualizar en la Figura 21 la producción del cultivo, siendo ($\bar{x} \pm S = 0,55 \pm 0,33$) t ha⁻¹, un valor bajo y guarda relación con lo mencionado por Oliver, S.N., Van Dongen, J.T., Alfred, S.C., Mamun, E.A., Zhao, X., Saini, H.S., Fernandes, S.F., Blanchard, C.L., Sutton, B.G., Geigenberger, P., Dennis, E.S., Dolferus, R., (2005) que el estrés por frío causa la desnaturalización de proteínas en las anteras en el paso tri-nucleico de la etapa de desarrollo temprano de microsporas en arroz, lo que resulta en infertilidad sustancial de polen.

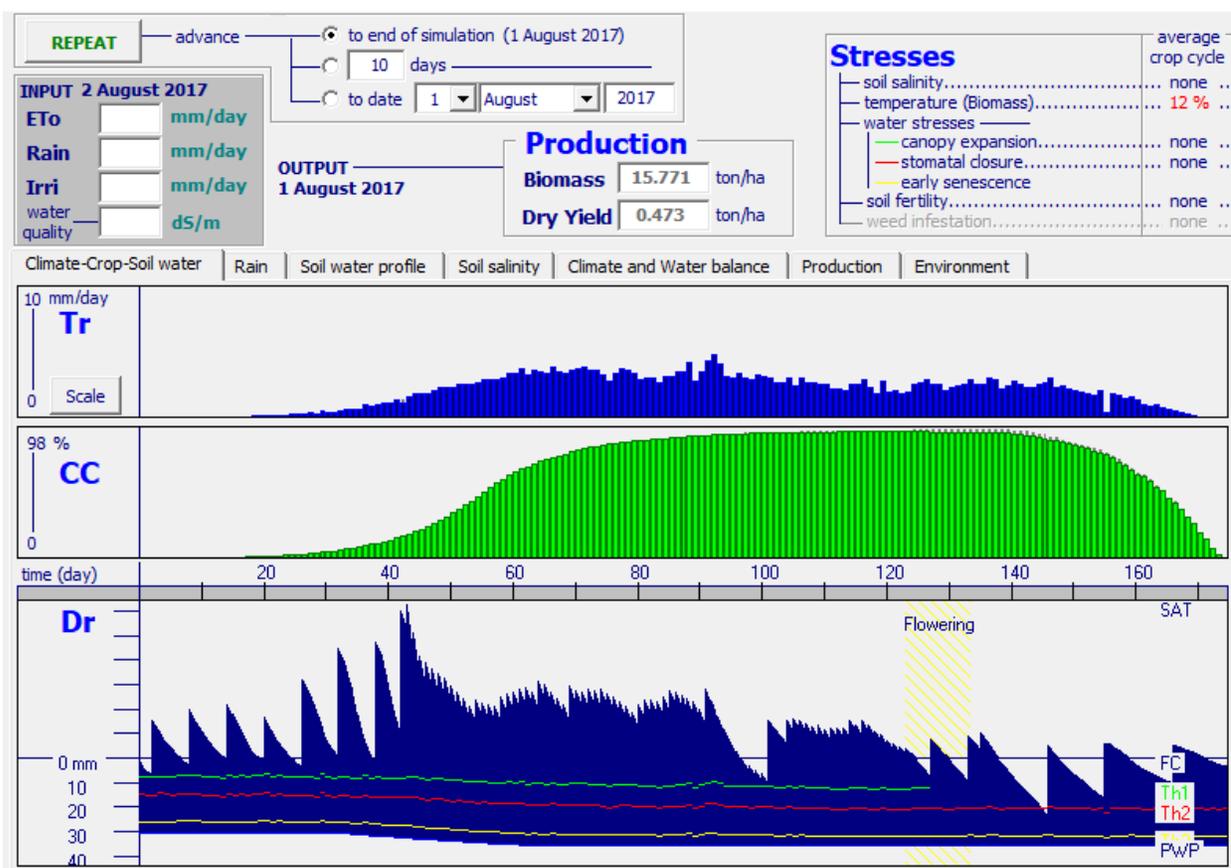


Figura 21: Panel de resultados de la simulación del modelo

Cabe resaltar, según Zhang *et al.*, (2004) existen cruces entre variedades de O. Japonica y O. Indica que poseen genes tolerantes al frío, por ende, los efectos identificados debido a las temperaturas bajas se pudieron minimizar, variedades que comúnmente se usan en el país de Chile debido a su clima.

En la Figura 22, se muestra la variación de la temperatura del aire durante el desarrollo del cultivo de arroz en las regiones de Arequipa y Lambayeque. En el caso de la región norteña, la temperatura se sitúa dentro del rango de la temperatura óptima propuesta por Chaudhary *et al.*, (2003) para la producción de granos fértiles (8,00 t ha⁻¹ por campaña 2015-2016). Por otro lado, en la región Arequipa, la temperatura media del aire es inferior a la temperatura óptima, pero se encuentra dentro del rango límite para el desarrollo del cultivo con una producción promedio de 12,50 tha⁻¹.

Se debe tomar en cuenta también la radiación solar, como mencionan Díaz S., Cristo E., Morejón R., Castro R., Shiraishi M., Dhanappala M., Keisuke A., (2013) es la fuente de energía para el proceso fotosintético y para la evapotranspiración, por lo cual se considera fundamental para obtener buenos rendimientos. Su efecto incide fundamentalmente en la etapa reproductiva (desde diferenciación de primordio a floración) afectando el número total de granos producidos por panojas.

Por ende, los valores de radiación solar en Arequipa (800 – 950 w m⁻², SENAMHI, (2015)) son mayores en comparación de Lambayeque (300 – 500 w m⁻², SENAMHI, (2015)) y Lima (11 – 250 w m⁻²) en correlación al rendimiento de las regiones. No obstante, se requiere verificar la existencia de otros factores que posiblemente favorezcan el rendimiento del cultivo, como la radiación y mayor nivel de tecnología aplicada.

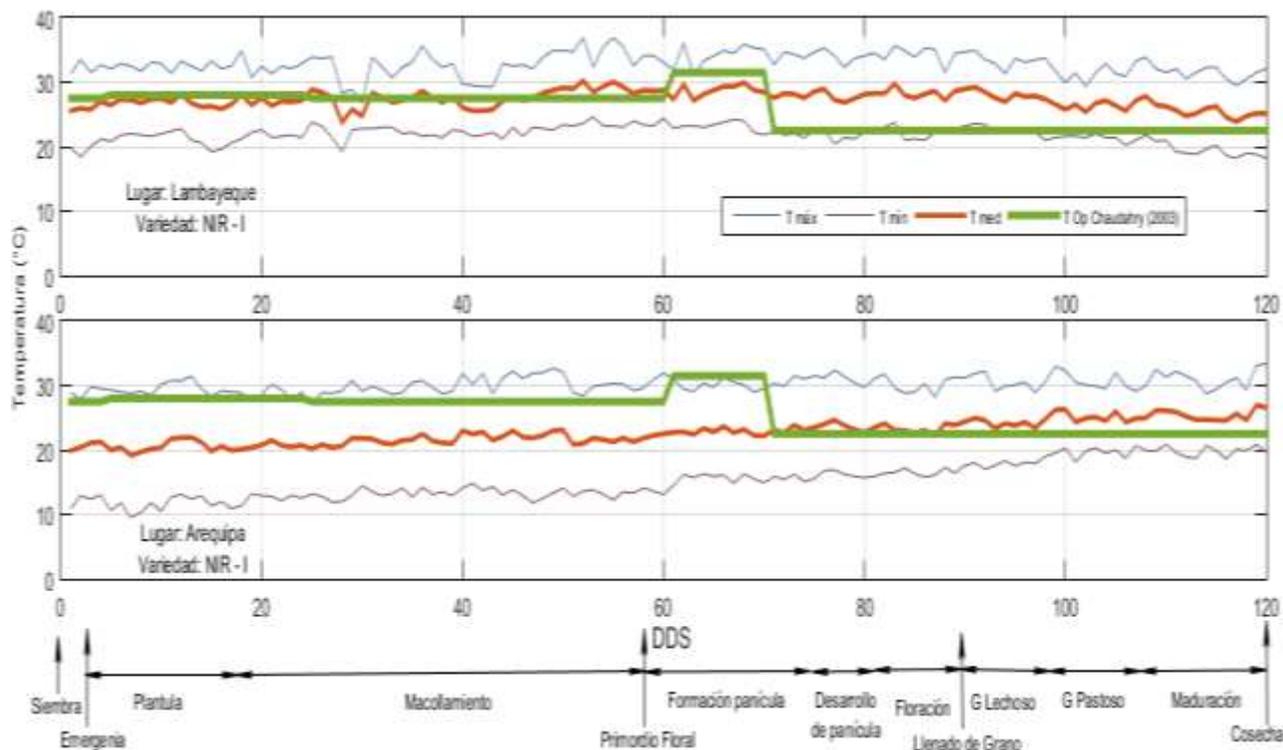


Figura 22: Variación y rangos de temperaturas óptimas en las regiones de Lambayeque y Arequipa

Nota. Variación de las $T_{máx}$, $T_{mín}$ y temperaturas medias durante el desarrollo del cultivo variedad NIR-I y temperaturas óptimas propuestas por Chaudhary et al., (2003). Intención de siembra la cuales se llevaron a cabo el 04/08/2015 y 02/01/2016 en los departamentos de Arequipa y Lambayeque respectivamente.

4.3. Calibración de parámetros

4.3.1 Cobertura del dosel

En la Figura 23, se visualiza la cobertura del dosel (CC) registrados durante el periodo vegetativo del cultivo y el simulado por el modelo, mostrándose la variación temporal a lo largo del periodo del experimento. El diagrama de cajas representa el valor observado medio y los datos atípicos.

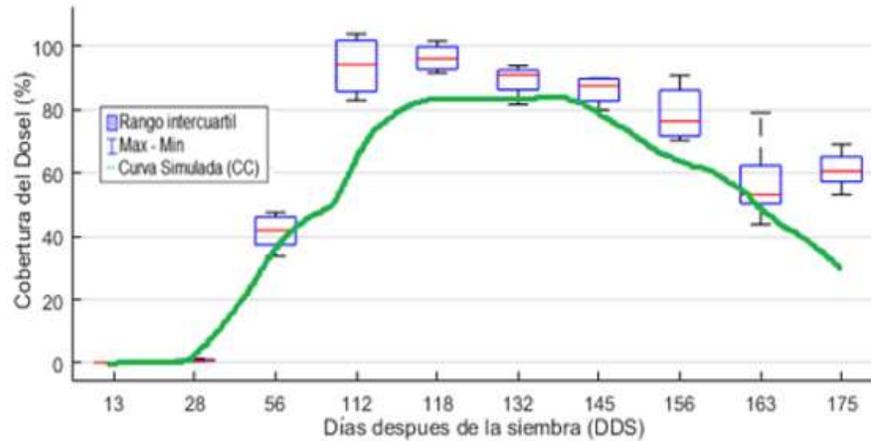


Figura 23: Variación temporal de la cobertura del dosel

Nota: Cobertura del dosel simulada y observada durante el periodo del cultivo: febrero 2017 – agosto 2017.

En la Tabla 16, se evaluaron índices de eficiencia como el EF y RSR obteniéndose valores de 0.83 y 14.90 respectivamente logrando una eficiencia de “muy bueno” a “bueno” según Moriasi *et al.*, (2007). El índice de Willmott se obtiene un valor de 0,96 estando de acuerdo a la evaluación; con respecto a la correlación de Pearson se obtuvo un r de 0.93 que es significativo para la prueba de Student.

Tabla 16: Indicadores estadísticos de la evaluación de la cobertura del dosel

Indicador de eficiencia	Símbolo	Valor
Coficiente de Nash-Sutcliffe	EF	0,83
Índice de error RSR	RSR	14.80
Índice de Willmott	d	0,96
Coficiente de correlación de Pearson	r	0,93

Nota: Resultados de las pruebas estadísticas de la eficiencia de la calibración de la cobertura del dosel observada y simulada.

Todos los parámetros estadísticos mencionados muestran una correlatividad aceptable entre la simulación de la cobertura del dosel y los datos recogidos en campo representados con el diagrama de cajas.

4.3.2. Humedad del suelo

En la Figura 24 se observa la humedad del suelo simulada por el modelo y la medida en campo; el ordenamiento inicial de los puntos no tiene una tendencia definida. En la parte central y en la

zona derecha superior del gráfico, los puntos se agrupan de forma lineal con pendiente positiva. Este resultado permite inferir, que a un rango menor de humedad la correlación es baja, pero a medida que las humedades observadas y simuladas aumentan, la relación aumenta de forma significativa respaldada de una alta densidad de datos; cabe resaltar que el modelo estima la humedad a determinadas profundidades y se seleccionó la profundidad de acuerdo a la ubicación del sensor de humedad volumétrica.

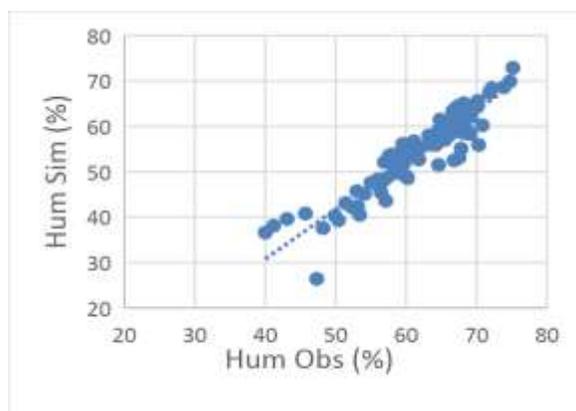


Figura 24: Datos comparativos de la humedad del suelo

Nota: Distribución de datos de humedad observada con humedad simulada, monitoreada a lo largo del periodo vegetativo del cultivo.

En la Tabla 17, se evaluaron índices de eficiencia como el EF y RSR obteniéndose valores de -0,17 y 7.90 respectivamente logrando una eficiencia de “aceptable” a “satisfactorio” según Moriasi *et al.*, (2007). El índice de Willmott se obtiene un valor de 0,80 estando de acuerdo a la evaluación; con respecto a la correlación de Pearson se obtuvo un r de 0.93 que es significativo para la prueba de Student.

Tabla 17: Indicadores estadísticos de la evaluación de la humedad del suelo

Indicador Estadístico	Símbolo	Valor
Coefficiente de Nash-Sutcliffe	EF	-0.16
Índice de error RSR	RSR	7.90
Índice de Willmott	d	0.80
Coefficiente de correlación de Pearson	r	0.93

Nota: Resultados de las pruebas estadísticas de la eficiencia de la calibración de la humedad del suelo observada y simulada.

Finalmente, los valores de los parámetros obtenidos después de la calibración a lo largo del periodo del experimento (febrero 2017 – agosto 2017) del arroz se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18: Parámetros conservativos utilizados en la investigación obtenidos en campaña del 2017 (feb–ago)

Descripción	Símbolo	Experimento
Fenología del cultivo		
Umbral de temperatura del aire		
Temperatura base	T _{base}	15,00
Temperatura superior	T _{upper}	35,00
Desarrollo del dosel del cultivo		
Superficie del suelo cubierto por una plántula (cm ² /planta).	cc _o	5,00
Número de plantas por hectárea.		540
GDD desde el trasplante hasta la recuperación		-
Coefficiente de crecimiento del dosel (fracción por GDD).	CGC	0,85
Cobertura máxima del dosel (%).	CC _x	98
Tiempo desde el trasplante hasta el inicio de la senescencia (GDD).		1139,25
Coefficiente de disminución del dosel (fracción por grado día de desarrollo).	CDC	0,15
Duración del ciclo de cultivo (GDD).		1247,35
Floración		
GDD hasta la floración		1065,70
Duración de la fase de la floración (GGD).		40,60
Determinación del cultivo en relación con la floración.		Si
Desarrollo de la zona de la raíz		
Profundidad mínima de enraizamiento.	Zn	0,185
Profundidad máxima de enraizamiento.	Zx	0,325
Factor de expansión de la zona de la raíz.		2,20
Transpiración del cultivo		
Coefficiente de cultivo cuando el dosel está completo, pero antes de la senescencia.	KC _{Tr,x}	1,10
Descenso del coeficiente de cultivo (% día) como consecuencia del envejecimiento, etc.		0,14
Efecto de la cobertura del dosel en la reducción de la evaporación del suelo en la etapa tardía de la temporada.		60
Producción de biomasa y formación de rendimiento		
Productividad de agua del cultivo		
Productividad del agua normalizada (gr/m ²)	WP*	15,00
Productividad del agua normalizada durante la formación del rendimiento (como %WP * antes de la formación del rendimiento).		98
Índice de cosecha		
Índice de cosecha de referencia (%).	HI _o	3
Posible aumento (%) de HI debido al estrés hídrico antes de la floración.		Ninguno
Exceso de frutos potenciales (%).		Alto
Coefficiente que describe el impacto positivo del crecimiento vegetativo restringido durante la formación del rendimiento en HI.		Bajo
Coefficiente que describe el impacto negativo del cierre de estomas durante la formación de rendimiento en HI.		Moderado
Aumento máximo permitido (%) del HI especificado.		5
Estrés		
Estrés por temperatura del aire		
Tmín del aire por debajo de la cual la polinización comienza a fallar (°C).		15,00
Tmáx del aire por encima de la cual la polinización comienza a fallar (°C).		35,00
GDD para la producción total de biomasa.		5,00

V. CONCLUSIONES

1. El modelo agrometeorológico Aquacrop permitió evaluar el efecto de la temperatura del aire en los estados fenológicos del cultivo, esto a través del GDD acumulado de $1247,35 < 1500-2000$ °C, valores obtenidos por Porras (2019); y un coeficiente de estrés térmico que se relaciona con el rendimiento del cultivo.
2. Los GDD en su etapa reproductiva (desarrollo de panícula y floración), son sensibles a variaciones de la temperatura, y para valores (\bar{x}) de $22,08$ °C $< 30-33$ °C, óptimos recomendados en floración (Chaudhary et al., 2003); obteniéndose un 90 por ciento de esterilidad en las panículas, evidenciándose un color marrón en las puntas de los granos debido a la quemadura por la temperatura, y posterior anticipación de la senescencia.
3. Se obtuvo un coeficiente de estrés térmico por temperatura fría (K_{scold}) < 1 , que se relaciona con temperatura en el rango de 10 a 15 °C en equivalencia a K_{scold} de 0 a 1 respectivamente, llegando a una condición crítica con formación de granos vanos, que afectaron al rendimiento del cultivo ($\bar{x} \pm S = 0,55 \pm 0,33$) t ha⁻¹.
4. La calibración del modelo AquaCrop tuvo un desempeño de “muy bueno” en la cobertura del dosel según los indicadores de EF, RSR, índice de Willmott y correlación de Pearson, con valores de $0,83$, $14,80$, $0,96$ y $0,93$ respectivamente. Los parámetros calibrados fueron, la T_{base} , Tupper, CGC, CCx, CDC, Kctrx, WP*, Hlo, con valores de 15 °C, 35 °C, $0,85$, 98% , $0,15$, $1,10$, 15 , 3% , respectivamente.

VI. RECOMENDACIONES

1. Validar en diferentes campañas, condiciones climáticas, sistema de riego, variedades de arroz y en campos comerciales de los registros de la fenología y GDD del cultivo del arroz para consolidar los resultados obtenidos.
2. Realizar experimentos para obtener temperaturas óptimas en cada fase del cultivo del arroz en cada zona productora del país en función a la fecha de siembra teniendo en cuenta la termosensibilidad de la variedad.
3. Implementar experimentos con diferentes tipos de estrés (hídrico, salinidad, nutrientes, etc.) existentes en el medio y validación en campos comerciales.
4. Es necesario seguir investigando el sistema del cultivo de arroz, difundir la información a los actores empíricos y capacitarlos en el uso del modelo Aquacrop.
5. Elaborar manuales técnicos de uso del AquaCrop, según los resultados obtenidos en las zonas productoras de arroz.
6. Establecer redes de productores de arroz para el intercambio de información técnica, para mejorar la producción, calidad del producto y optimización de los recursos empleados en la campaña.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Apel, K., Hirt, H. (2004). *Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction*. *Annu Rev Plant Biol* 55: 373 – 399. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141701>
- Altamirano, L. (2018). Rendimiento del cultivo de arroz con Sistema de riego por goteo en La Molina. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Bonnecarrère V, Borsani O, Díaz P, Capdevielle F, Blanco P, Monza J. (2011). *Response to photooxidative stress induced by cold in japonica rice is genotype dependent*. *Plant Sci* 180(5):726–732. <https://doi.org/10.1007/s10681-014-1290-2>
- Chaudhary, R., Nanda, J., Tran, D. (2003). *Guía para identificar las limitaciones de campo en la producción de arroz*. Comisión internacional del arroz. Roma.
- Chinnusamy, V., Zhu, J., Zhu, JK. (2006). *Gene regulation during cold acclimation in plants*. *Physiol Plant* 126(1):52–61. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2006.00596.x>
- De Datta, S. (1986). *Producción de arroz fundamentos y prácticas*. Limusa. México. p.341-393
- Díaz S., Cristo E., Morejón R., Castro R., Shiraishi M., Dhanappala M., Keisuke A. (2013). *Análisis de la estructura productiva y comportamiento del rendimiento de cuatro variedades de arroz (oryza sativa l.) de diferentes orígenes en la prefectura de Ibaraki, Japón*. *Cultivos Tropicales*, 34(1),42-50. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193227543007>
- Fageria, N. (2003). *Plant tissue test for determination of optimum concentration and uptake of nitrogen at different growth stages in low land rice*. *Com.Soil Sci. Plant Anal.* 34, 259 – 270. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(07\)60095-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(07)60095-2)
- Fageria, N. (2007). *Yield physiology of rice*. *Plant Nutr.* 30, 843 – 879. <https://doi.org/10.1080/15226510701374831>
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2004). *Todo sobre el arroz*. Año Internacional del Arroz. Roma.
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2005). *Global Climate Changes and Rice Food Security*. FAO, Rome.

- FAO (Food and agriculture data). 2021. Crops. Recuperado 02 de marzo del 2021, de <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- Foolad M, Lin G, Chen F (1999) *Comparison of QTLs for seed germination under non-stress, cold stress and salt stress in tomato*. Plant Breed 118(2):167–173
- Garg, A., Kim, J., Owens, T., Ranwala, A., Kochian, I., Wu, R. (2002). *Trehalose accumulation in rice plants confers high tolerance levels to different abiotic stresses*. PNAS 99, 15898 – 15903. <https://doi.org/10.1073/pnas.252637799>
- González, N., Zamorano, D. (2009). *El cultivo del arroz (Oryza sativa L.)*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) Chile. Santiago.
- Haboudane, D., Miller J.R., Tremblay N., Zarco-Tejada P.J., Dextraze L. (2002). *Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture*. Remote Sens Environ 81(2):416 – 426. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00018-4)
- Hernández, N., Soto, C. F., Caballero C. A. (2009). *Modelos de simulación de cultivos, características y usos*. La Habana.
- Heros, A. (2012). *Manual técnico de manejo Integrado del arroz*. Universidad Nacional Agraria La Molina. 33-32 pp.
- Hirsh, R., Helsel, D., Cohn, T. & Gilroy, E. (1992). *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill.
- INIA (Instituto Nacional de Innovación Agraria). (2011). *Tecnología en arroz*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. Lima.
- Jagdish, S., Crauford, P., Wheeler, T. (2007). *High temperature stress and spikelet fertility in rice (Oryza sativa L.)*. J. Exp. Bot. 58, 1627–1635. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm003>
- Kandpal, R., Rao, N., (1985). *Alterations in the biosynthesis of proteins and nucleic acids in finger millet (Eleusine coracana) seedlings during water stress and the effect of proline on protein biosynthesis*. Plant Sci 40 (2): 73 – 79. [https://doi.org/10.1016/0168-9452\(85\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0168-9452(85)90044-5)
- Kim S-I., Tai T.H. (2011) *Evaluation of seedling cold tolerance in rice cultivars: a comparison of visual ratings and quantitative indicators of physiological changes*. Euphytica 178(3):437–447. <https://doi.org/10.1007/s10681-010-0343-4>
- Korres, N., Norsworthy, J., Tehranchian, P., Gitsopoulos, T., Loka, D., Oosterhuis, D., Moss, S., Gealy, D., Burgos, N., Miller, R., Palhano, M. (2016). *Cultivars to face climate change effects on crops and weeds: a review*. Agron. Sustain. Devel. 36 (12). <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0350-5>

- Kuroki, M., Saito, K., Matsuba, S., Yokogami, N., Shimisu, H., Ando, I., Sato, Y., (2007). *A quantitative trait locus for cold tolerance at the booting stage on rice chromosome 8*. Theor. Appl. Genet. 115, 593-600. <https://doi.org/10.1007/s00122-007-0589-y>
- Matsui, T., Omasa, K., Horie, T., (1997). *High temperature induced spikelet sterility of japonica rice at flowering in relation to air humidity and wind velocity conditions*. Jpn. J. CropSci. 66, 449 – 455. <https://doi.org/10.1626/jcs.47.6>
- Mendoza, A. (2013). *Manual Riego por Goteo*. Centro Nacional de Tecnología Agropecuario y Forestal “Enrique Álvarez Córdova” (CCENTA), Ministerio de Agricultura y Ganadería de Salvador (MAG). El Salvador. 24p.
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego [MIDAGRI], (s.f.). *Producción*. <https://www.midagri.gob.pe/portal/26-sector-agrario/arroz/218-produccion?start=7>
- Ministerio de Economía y Finanzas (MEF). (2011). *Dirección general de política de inversiones*. Lima.
- Mittal, D., Madhyastha, D., Grover, A. (2012). *Genome-Wide Transcriptional Profiles during temperature and oxidative stress reveal coordinated expression Patterns and overlapping regulons in rice*. PLoS One 7(7): 40 – 99. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040899>
- Morsy, M.R., Jouve, L., Hausman, J.F., Hoffmann, L., Stewart, J.M.D. (2007). *Alteration of oxidative and carbohydrate metabolism under abiotic stress in two rice (Oryza sativa L.) genotypes contrasting in chilling tolerance*. J Plant Physiol 164(2):157–167. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.12.004>
- McFarlane, J., Watson, R., Theisen, A., Jackson, R.D., Ehrler, W., Pinter, P., Jr Idso, S.B., Reginato, R. (1980). *Plant stress detection by remote measurement of fluorescence*. Appl Opt 19(19):3287–3289. <https://doi.org/10.1364/AO.19.003287>
- Murata, N., Los, D.A. (1997). *Membrane fluidity and temperature perception*. Plant Physiol 115(3):875. <https://doi.org/10.1104/pp.115.3.875>
- Nagasawa, N., Kawamoto, T., Matsunaga, K., Sasaki, T., Nagato, Y., Hinata, K., (1994). *Cold temperature sensitive mutants at the booting stage of rice*. Breed. Sci. 44, 53-57. <https://doi.org/10.1270/jsbbs1951.44.53>
- Nagao, M., Minami, A., Arakawa, K., Fujikawa, S., Takezawa, D. (2005). *Rapid degradation of starch in chloroplasts and concomitant accumulation of soluble sugars associated with ABA-induced freezing tolerance in the moss Physcomitrella patens*. J Plant Physiol 162(2):169–180. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.06.012>
- Nakashima, K., Tran, L., Van Nguyen, D., Fujita, M., Maruyama, K., Todaka, D., Ito, Y., Hayashi, N., Shinozaki, K., Yamaguchi-Shinozaki, K. (2007). *Functional analysis of a*

NAC - type transcription factor OsNAC6 involved in abiotic and biotic stress responsive gene expression in rice. Plant J 51(4): 617 – 630. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2007.03168.x>

Nguyen, V. (2005). *El futuro del arroz. Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.* Roma.

Organización Meteorológica Mundial [OMM], (2011). *Guía de prácticas hidrológicas.* Ginebra.

Oliver, S.N., Van Dongen, J.T., Alfred, S.C., Mamun, E.A., Zhao, X., Saini, H.S., Fernandes, S.F., Blanchard, C.L., Sutton, B.G., Geigenberger, P., Dennis, E.S., Dolferus, R., (2005). *Cold-induced repression of the rice anther-specific cell wall invertase gene OSINV4 is correlated with sucrose accumulation and pollen sterility.* Plant Cell Environ. 28, 1534-1551. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01390.x>

Raes, D., Fereres, E., Hsiao, T., Steduto, P. (2012). *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua.* Manual de riego y drenaje FAO 66. Roma. 32p. <http://www.fao.org/3/i2800s/i2800s.pdf>

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. y Fereres, E. (2011). *Aquacrop - Reference Manual.* Disponible en: <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>.

Salazar Gutierrez, M., Johnson, J., Chaves Cordoba, B., Hoogenboom, G. (2013). *Relationship of base temperature to development of winter wheat.* International journal of plant production, 7(4), 741-762. <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=339873>

Satake, T., Hayase, H., (1976). *Male sterility caused by cooling treatment at the young microspore stage in rice plants. v. estimation of pollen developmental stage and the most sensitive stage to coolness.* Proc. Crop Sci. Soc. Jpn. 39, 468-473. <https://doi.org/10.1626/jcs.39.468>

Schobert, B., Tschesche, H. (1978). *Unusual solution properties of proline and its interaction with proteins.* Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects 541(2):270–277. [https://doi.org/10.1016/0304-4165\(78\)90400-2](https://doi.org/10.1016/0304-4165(78)90400-2)

Shah, K., Dubey, R. (1997). *Effect of cadmium on proline accumulation and ribonuclease activity in rice seedlings: role of proline as a possible enzyme protectant.* Biol Plant 40(1):121–130. <https://doi.org/10.1007/s11738-998-0013-5>

Sharda, R., Mahajan, G., Siag, M., Singh, A. (2015). *Desempeño del arroz de siembra seca irrigado por goteo (Oryza sativa l.) en el sur de Asia.* Ludhiana. <https://doi.org/10.1007/s10333-016-0531-5>

Sharma, P., Sharma, N., Deswal, R. (2005). *The molecular biology of the low temperature response in plants.* BioEssays 27 (10):1048–1059. <https://doi.org/10.1002/bies.20307>

- Shirasawa S, Endo T, Nakagomi K, Yamaguchi M, Nishio T (2012) *Delimitation of a QTL region controlling cold tolerance at booting stage of a cultivar, 'Lijiangxintuanheigu', in rice, Oryza sativa L.* Theor Appl Genet 124:937–946
- Sangwan, V., Örvar, B.L., Beyerly, J., Hirt, H., Dhindsa, R.S. (2002). *Opposite changes in membrane fluidity mimic cold and heat stress activation of distinct plant MAP kinase pathways.* Plant J 31(5):629–638. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313x.2002.01384.x>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI]. (2015). *Dirección de redes de observación y datos.* Lima.
- Suzuki, N., Mittler, R. (2006). *Reactive oxygen species and temperature stresses: a delicate balance between signaling and destruction.* Physiol Plant 126 (1): 45 – 51. <https://doi.org/10.1111/j.0031-9317.2005.00582.x>
- Venekamp, J.H. (1989). *Regulation of cytosol acidity in plants under conditions of drought.* Physiol Plant 76(1):112–117. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1989.tb05461.x>
- Yoshida, S. (1981). *Fundamentals of Rice Crop Science.* IRRI, Los banos, Philippines, p.269.
- Yuanyuan, M., Yali, Z., Jiang, L., Hongbo, S. (2010). *Roles of plant soluble sugars and their responses to plant cold stress.* Afr J Biotechnol 8(10):2004–2010
- Yuliawan, T., Handoko, I. (2016). *The effect of temperature rise to rice crop yield in Indonesia uses Shierary Rice model with geographical information system (GIS) feature.* Indonesia. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.072>
- Rang Z.W.; Jagadish S.V.K.; Zhou Q. M.; Craufurd P.Q.; Hever S., 2011. Effect of high temperature and water stress on pollen germination and spikelet fertility in rice. *Environmental and Experimental Botany* 70 (2011) 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.08.009>
- Zahedi, H., Alahmadi, S.M.J. (2007). *Effects of drought stress on chlorophyll fluorescence parameters, chlorophyll content and grain yield of wheat cultivars.* J Biol Sci 7(6):841–847. <https://doi.org/10.3923/jbs.2007.841.847>
- Zhang, Q., Chen, Q., Wang, Sh., Hong, Y., Wang, Zh. (2014). *Rice and cold stress: methods for its evaluation and summary of cold tolerance-related quantitative trait loci.* Rice 2014 7:24. <https://doi.org/10.1186/s12284-014-0024-3>

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: CUADRO DE CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES DE HUMEDAD

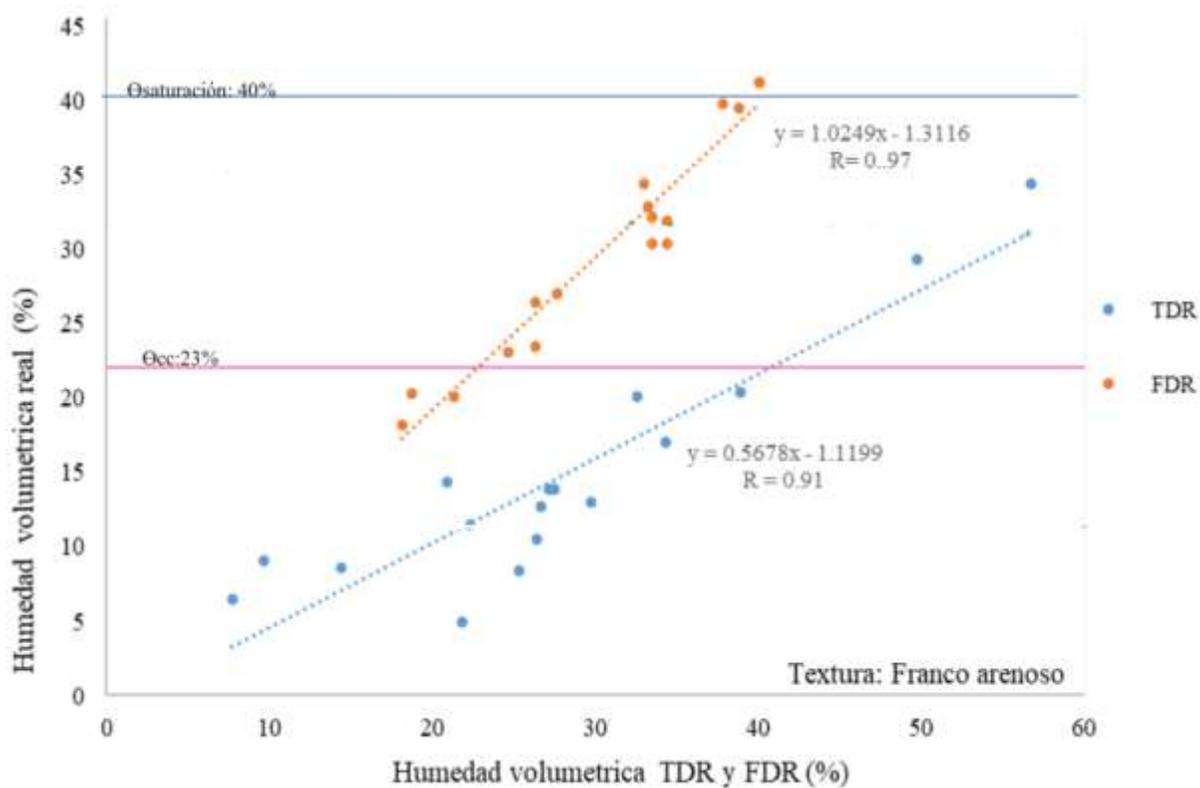


Figura 25: Gráfico de calibración de los instrumentos de humedad

Nota: Recta de calibración del medidor de la humedad del suelo con TDR300 (varillas de 20 cm), FDR (GS1 profundidad a 15 y 30 cm).

ANEXO 2: PANEL FOTOGRÁFICO DEL DESARROLLO DEL CULTIVO.



a. Macollamiento (64 DDS): 12 abril



b. Punto de algodón (93 DDS): 11/05



c. Desarrollo de panicula (120 DDS): 07 junio



d. Floracion (132 DDS): 19 junio



e. Grano pastoso (156 DDS): 13 julio



f. Grano duro (164 DDS): 21 julio

Figura 26: Comportamiento del cultivo en su fase vegetativa

Nota: Imágenes de desarrollo del cultivo realizado en los meses de febrero a agosto del 2017

ANEXO 3: PANEL FOTOGRÁFICO PARA LA MEDICIÓN DEL ÁREA DEL DOSEL



a. 13 DDS: 21 febrero



b. 28 DDS: 08 marzo



c. 56 DDS: 05 abril



d. 132 DDS: 20 junio



e. 164 DD: 21 julio



f. 175 DD: 02 agosto

Figura 27: Toma de área de cobertura del dosel

Nota. Imágenes de la cobertura del dosel con malla de 1,00 m x 0,25 m (a, b) y calibrador de 0,07 m x 0,11 m (c, d, e, f)

ANEXO 4: INFORMACIÓN METEOROLÓGICA DEL LUGAR DEL EXPERIMENTO

Tabla 19: Datos recopilados de la estación meteorológica

FECHA	DDS	T Max (°C)	T Min (°C)	HR (%)	Rad (MJm ⁻² día ⁻¹)	Vel viento (ms ⁻¹)	P (mm)	ETo (mm)
08/02/2017	1	30,60	21,50	75,00	63393	1,20	0,00	5,41
09/02/2017	2	31,40	20,80	76,00	56980	0,90	0,00	4,95
10/02/2017	3	30,60	21,10	74,00	52094	1,00	0,00	5,22
11/02/2017	4	31,80	22,40	68,00	46854	1,10	0,00	6,28
12/02/2017	5	31,60	21,50	72,00	49450	0,90	0,00	5,44
13/02/2017	6	31,20	21,40	75,00	54571	0,80	0,00	4,96
14/02/2017	7	31,80	21,70	72,00	53842	0,90	0,00	5,48
15/02/2017	8	31,70	21,00	71,00	57431	1,10	0,00	5,77
16/02/2017	9	32,60	21,90	74,00	36309	0,90	0,00	5,39
17/02/2017	10	31,60	22,20	72,00	56435	0,80	0,00	5,36
18/02/2017	11	31,00	22,00	78,00	48751	1,20	0,00	5,17
19/02/2017	12	32,10	20,50	77,00	58113	1,00	0,00	5,01
20/02/2017	13	31,60	20,50	74,00	54321	0,80	0,00	4,61
21/02/2017	14	31,00	20,90	78,00	48534	0,60	0,00	4,42
22/02/2017	15	32,20	21,00	75,00	51701	1,00	0,00	5,27
23/02/2017	16	31,80	20,10	77,00	50179	0,80	0,00	4,72
24/02/2017	17	31,60	20,10	75,00	50202	1,00	0,00	5,12
25/02/2017	18	32,00	21,00	76,00	42540	0,90	0,00	5,03
26/02/2017	19	32,20	21,00	71,00	40349	0,80	0,00	5,39
27/02/2017	20	32,40	23,00	75,00	42391	1,10	0,00	5,64
28/02/2017	21	32,20	23,20	77,00	43321	1,60	0,00	6,04
01/03/2017	22	31,40	22,80	82,00	34841	1,30	0,00	4,80
02/03/2017	23	31,80	22,90	76,00	25257	1,30	0,00	5,59
03/03/2017	24	32,40	22,20	78,00	28219	1,00	0,00	4,98
04/03/2017	25	32,00	22,10	76,00	21046	1,00	0,00	5,15
05/03/2017	26	31,70	21,20	77,00	28438	0,90	0,00	4,81
06/03/2017	27	32,10	22,30	74,00	23385	1,00	0,00	5,38
07/03/2017	28	32,00	21,50	73,00	21204	1,00	0,00	5,40
08/03/2017	29	29,50	21,10	79,00	9665	0,80	0,00	4,31
09/03/2017	30	32,40	22,00	69,00	18862	1,50	0,00	6,72
10/03/2017	31	32,20	22,50	77,00	34510	0,80	0,00	4,86
11/03/2017	32	31,30	21,60	81,00	7708	0,80	0,00	4,33
12/03/2017	33	32,30	21,60	81,00	12146	1,00	0,00	4,61
13/03/2017	34	30,90	24,40	65,56	3167	0,81	0,00	5,09
14/03/2017	35	28,90	23,00	75,56	5117	0,48	1,20	4,47
15/03/2017	36	30,30	22,60	78,33	10209	0,43	1,80	4,45
16/03/2017	37	31,00	23,70	67,16	56945	0,90	0,00	5,29
17/03/2017	38	30,80	22,70	74,39	66615	0,66	0,00	4,79

18/03/2017	39	30,80	22,30	71,50	69617	0,66	0,00	4,98
19/03/2017	40	29,70	22,80	75,65	56317	0,63	0,00	4,76
20/03/2017	41	30,00	22,20	76,53	59764	0,71	0,00	4,71
21/03/2017	42	30,60	22,30	73,77	66237	0,75	0,00	4,87
22/03/2017	43	29,60	23,60	72,87	58943	0,69	0,00	4,95
23/03/2017	44	30,90	22,60	70,07	58818	0,66	0,00	5,07
24/03/2017	45	29,70	22,10	70,32	63240	0,69	0,00	5,05
25/03/2017	46	30,30	21,00	68,46	60124	0,61	0,00	4,92
26/03/2017	47	29,10	21,80	74,41	51690	0,56	0,00	4,56
27/03/2017	48	30,40	22,20	71,28	50591	0,62	0,00	4,82
28/03/2017	49	29,70	22,60	70,17	57700	0,71	0,00	4,96
29/03/2017	50	28,00	21,20	76,91	63393	0,78	0,00	4,60
30/03/2017	51	28,90	20,90	78,40	56980	0,68	0,00	4,35
31/03/2017	52	28,50	21,20	76,31	52094	0,65	0,00	4,53
01/04/2017	53	29,40	21,30	75,34	46854	0,68	0,00	6,21
02/04/2017	54	28,20	20,20	78,30	49450	0,60	0,00	5,41
03/04/2017	55	27,90	20,70	78,02	54571	0,68	0,00	5,03
04/04/2017	56	29,10	20,10	76,57	53842	0,64	0,00	5,48
05/04/2017	57	28,70	20,10	78,27	57431	0,71	0,00	5,46
06/04/2017	58	27,60	20,20	76,72	36309	0,49	0,00	4,45
07/04/2017	59	29,20	20,20	70,27	56435	0,63	0,00	5,51
08/04/2017	60	28,90	20,80	75,40	48751	0,60	0,00	5,56
09/04/2017	61	28,70	20,10	74,92	58113	0,58	0,00	5,06
10/04/2017	62	28,90	22,00	70,77	54321	0,68	0,00	5,71
11/04/2017	63	27,40	20,10	79,45	48534	0,62	0,00	4,93
12/04/2017	64	28,30	20,20	77,29	51701	0,68	0,00	5,41
13/04/2017	65	28,00	19,90	78,62	50179	0,60	0,00	4,97
14/04/2017	66	27,40	19,60	78,75	50202	0,67	0,00	5,24
15/04/2017	67	28,30	19,50	79,14	49121	0,63	0,00	5,34
16/04/2017	68	26,50	19,70	80,91	47873	0,64	0,00	4,79
17/04/2017	69	26,40	19,50	79,55	47534	0,61	0,00	5,15
18/04/2017	70	29,40	19,10	74,78	46195	0,53	0,00	5,01
19/04/2017	71	28,60	21,20	76,00	40423	0,59	0,00	6,09
20/04/2017	72	28,40	19,90	77,41	47956	0,66	0,00	5,39
21/04/2017	73	28,20	20,10	81,94	40372	0,52	0,00	5,41
22/04/2017	74	27,90	19,60	81,58	44536	0,69	0,00	5,32
23/04/2017	75	25,70	19,60	86,61	29306	0,62	0,00	4,72
24/04/2017	76	23,60	18,80	87,81	14254	0,46	0,20	4,08
25/04/2017	77	26,60	19,60	78,17	28677	0,47	0,00	4,79
26/04/2017	78	27,40	18,30	80,63	42964	0,55	0,00	5,10
27/04/2017	79	26,80	19,30	79,92	43096	0,60	0,00	5,15
28/04/2017	80	25,80	19,20	84,54	42682	0,67	0,00	4,68
29/04/2017	81	20,40	18,60	91,85	8974	0,47	0,00	4,18

30/04/2017	82	21,20	18,00	90,77	11694	0,36	0,20	3,87
01/05/2017	83	24,70	18,80	86,80	34237	0,54	0,00	3,23
02/05/2017	84	22,60	18,10	88,94	21494	0,55	0,00	2,66
03/05/2017	85	26,10	17,80	85,29	35396	0,55	0,00	3,03
04/05/2017	86	24,50	17,80	83,20	42779	0,64	0,00	3,09
05/05/2017	87	25,60	17,70	81,05	42396	0,64	0,00	3,24
06/05/2017	88	25,70	18,30	80,13	37573	0,56	0,00	3,37
07/05/2017	89	27,80	19,30	74,30	40574	0,60	0,00	4,01
08/05/2017	90	23,30	18,40	87,84	29855	0,51	0,00	2,82
09/05/2017	91	25,70	18,10	78,19	40541	0,51	0,00	3,45
10/05/2017	92	29,50	19,50	67,93	42540	0,61	0,00	4,56
11/05/2017	93	29,10	19,60	67,55	40349	0,56	0,00	4,57
12/05/2017	94	26,80	18,80	73,04	42391	0,56	0,00	3,95
13/05/2017	95	25,30	17,90	83,81	43321	0,59	0,00	3,12
14/05/2017	96	24,70	19,30	84,36	34841	0,59	0,00	3,16
15/05/2017	97	25,90	19,10	83,78	25257	0,46	0,00	3,21
16/05/2017	98	23,80	18,80	86,42	28219	0,62	0,00	2,92
17/05/2017	99	23,20	17,90	87,44	21046	0,46	0,20	2,80
18/05/2017	100	24,10	18,00	84,13	28438	0,60	0,00	3,03
19/05/2017	101	23,10	18,30	84,54	23385	0,64	0,00	3,02
20/05/2017	102	22,60	17,80	85,77	21204	0,56	0,00	2,89
21/05/2017	103	20,10	17,60	87,96	9665	0,43	0,00	2,62
22/05/2017	104	21,60	16,60	88,52	18862	0,38	0,00	2,60
23/05/2017	105	24,30	16,90	87,55	34510	0,62	0,00	2,78
24/05/2017	106	19,90	17,60	91,13	7708	0,43	0,00	2,46
25/05/2017	107	22,60	18,20	85,91	12146	0,45	0,00	2,90
26/05/2017	108	19,80	18,30	90,18	1030	0,07	0,00	2,51
27/05/2017	109	19,00	18,50	88,21	0	0,14	0,00	2,58
28/05/2017	110	20,80	17,20	90,42	10746	0,41	0,00	2,50
29/05/2017	111	21,10	17,70	91,24	11173	0,43	0,00	2,48
30/05/2017	112	18,70	17,30	94,64	7312	0,32	0,20	2,26
31/05/2017	113	18,30	16,80	95,15	5866	0,26	0,60	2,19
01/06/2017	114	19,20	16,70	93,56	6178	0,16	0,20	3,02
02/06/2017	115	20,80	17,40	87,25	11476	0,29	0,00	2,89
03/06/2017	116	20,70	16,60	85,94	13488	0,45	0,00	2,62
04/06/2017	117	21,30	17,00	86,69	15675	0,41	0,00	2,60
05/06/2017	118	19,70	16,20	90,73	7571	0,32	0,20	2,78
06/06/2017	119	17,60	16,10	95,10	1157	0,15	0,20	2,46
07/06/2017	120	23,12	16,19	86,65	63240	0,56	0,00	4,92
08/06/2017	121	19,66	16,12	91,57	60124	0,59	0,00	4,56
09/06/2017	122	20,00	16,10	92,64	51690	0,59	0,00	4,82
10/06/2017	123	19,07	15,64	92,25	50591	0,46	0,00	4,96
11/06/2017	124	19,37	15,04	91,65	57700	0,62	0,00	4,60

12/06/2017	125	23,63	13,84	88,46	63393	0,46	0,00	4,35
13/06/2017	126	23,17	13,45	86,60	56980	0,60	0,00	4,53
14/06/2017	127	23,17	16,02	86,65	52094	0,64	0,00	6,21
15/06/2017	128	23,01	15,44	85,74	46854	0,56	0,00	5,41
16/06/2017	129	22,34	15,55	85,34	49450	0,43	0,00	5,03
17/06/2017	130	18,44	15,20	86,38	54571	0,38	0,00	5,48
18/06/2017	131	20,25	15,31	83,83	53842	0,62	0,00	5,46
19/06/2017	132	23,43	15,32	84,68	57431	0,43	0,00	4,45
20/06/2017	133	22,33	16,04	86,25	36309	0,45	0,00	5,51
21/06/2017	134	24,08	16,16	83,87	13488	0,07	0,00	5,56
22/06/2017	135	22,53	15,88	85,39	15675	0,14	0,00	5,06
23/06/2017	136	24,03	15,54	82,86	7571	0,41	0,00	5,71
24/06/2017	137	22,34	14,59	83,91	6157	0,43	0,00	4,93
25/06/2017	138	23,02	13,43	85,56	8546	0,32	0,00	5,41
26/06/2017	139	21,30	15,60	80,67	10233	0,26	0,00	4,97
27/06/2017	140	21,90	14,20	84,99	27427	0,44	0,00	5,24
28/06/2017	141	19,40	14,40	87,86	10576	0,45	0,00	5,34
29/06/2017	142	19,70	16,40	87,38	8149	0,44	0,00	4,79
30/06/2017	143	21,20	16,10	85,74	14805	0,46	0,00	5,15
01/07/2017	144	19,80	16,20	87,89	10766	0,47	0,00	5,01
02/07/2017	145	19,70	16,00	87,95	12871	0,46	0,00	6,09
03/07/2017	146	19,90	15,50	86,15	12445	0,50	0,00	5,39
04/07/2017	147	21,60	15,60	86,18	21401	0,55	0,00	5,41
05/07/2017	148	21,10	16,20	83,18	14642	0,49	0,00	5,32
06/07/2017	149	22,60	16,30	81,80	22222	0,53	0,00	4,72
07/07/2017	150	20,70	16,20	86,02	14476	0,57	0,00	4,08
08/07/2017	151	21,30	15,80	83,93	19163	0,54	0,00	4,79
09/07/2017	152	20,80	15,70	86,08	14627	0,52	0,00	5,15
10/07/2017	153	18,70	16,10	85,22	9823	0,49	0,00	5,01
11/07/2017	154	19,80	15,70	84,45	13871	0,38	0,00	6,09
12/07/2017	155	18,70	15,90	88,10	8365	0,42	0,00	5,39
13/07/2017	156	18,70	15,80	90,64	6456	0,28	0,00	5,41
14/07/2017	157	20,40	14,70	84,07	14683	0,35	0,00	4,97
15/07/2017	158	20,40	15,70	83,45	16174	0,54	0,00	5,24
16/07/2017	159	18,00	15,90	85,75	1827	0,26	0,00	5,34

ANEXO 5: LÁMINA APLICADA EN EL CULTIVO DE ARROZ EN LA PARCELA DE AER.

Tabla 20: Registro de aplicaciones de lámina de riego

FECHA	DDS	Lámina aplicada (mm)			
10/02/2017	3	22	18/04/2017	70	15
16/02/2017	9	22	19/04/2017	71	6
22/02/2017	15	22	20/04/2017	72	6
28/02/2017	21	22	21/04/2017	73	8
06/03/2017	27	35	22/04/2017	74	6
12/03/2017	33	44	23/04/2017	75	8
18/03/2017	39	52	24/04/2017	76	5
22/03/2017	43	60	25/04/2017	77	5
23/03/2017	44	10	26/04/2017	78	5
24/03/2017	45	10	27/04/2017	79	5
25/03/2017	46	8	28/04/2017	80	5
26/03/2017	47	10	29/04/2017	81	10
27/03/2017	48	8	30/04/2017	82	7
28/03/2017	49	8	01/05/2017	83	5
29/03/2017	50	8	02/05/2017	84	5
30/03/2017	51	6	03/05/2017	85	7
31/03/2017	52	7	04/05/2017	86	9
01/04/2017	53	6	05/05/2017	87	5
02/04/2017	54	6	06/05/2017	88	5
03/04/2017	55	10	07/05/2017	89	6
04/04/2017	56	6	08/05/2017	90	6
05/04/2017	57	6	09/05/2017	91	3
06/04/2017	58	6	10/05/2017	92	15
07/04/2017	59	10	11/05/2017	93	2
08/04/2017	60	8	12/05/2017	94	2
09/04/2017	61	8	13/05/2017	95	2
10/04/2017	62	8	14/05/2017	96	1
11/04/2017	63	8	15/05/2017	97	1
12/04/2017	64	5	16/05/2017	98	2
13/04/2017	65	12	17/05/2017	99	2
14/04/2017	66	6	18/05/2017	100	2
15/04/2017	67	5	19/05/2017	101	2
16/04/2017	68	5	20/05/2017	102	25
17/04/2017	69	5	23/05/2017	105	10
			24/05/2017	106	5
			25/05/2017	107	3
			26/05/2017	108	3
			27/05/2017	109	3
			28/05/2017	110	3

29/05/2017	111	3	08/06/2017	121	2
30/05/2017	112	5	09/06/2017	122	2
31/05/2017	113	3	10/06/2017	123	2
01/06/2017	114	3	11/06/2017	124	2
02/06/2017	115	3	15/06/2017	128	15
03/06/2017	116	3	21/06/2017	134	18
04/06/2017	117	6	23/06/2017	136	7
05/06/2017	118	2	04/07/2017	147	28
06/06/2017	119	2	13/07/2017	156	22
07/06/2017	120	2	24/07/2017	167	15

ANEXO 6: ANÁLISIS DE SUELO Y AGUA



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DRH
LABORATORIO DE AGUA, SUELO, MEDIO AMBIENTE Y FERTIRRIEGO

Av. La Molina s/n. Telefax: 6147800. Anexo 225 Lima. E-mail: las-fa@la Molina.edu.pe



Nº 007007

ANÁLISIS DE AGUA - RUTINA

SOLICITANTE : ING. LIA RAMOS

PROYECTO : AD y ER

PROCEDENCIA : Canal

RESPONSABLE ANALISIS : Ing. Nore Arévalo Flores

FECHA DE ANALISIS : La Molina, 14 de Julio del 2017

N° LABORATORIO	7907
N° DE CAMPO	Agua de Canal
CE dS/m	0.02
pH	7.90
Calcio meq/l	8.47
Magnesio meq/l	1.24
Sodio meq/l	2.43
Potasio meq/l	0.19
SUMA DE CATIONES	9.38
Cloruro meq/l	4.70
Sulfato meq/l	1.55
Bicarbonato meq/l	3.37
Nitrato meq/l	0.06
Carbonatos meq/l	0.05
SUMA DE ANIONES	9.69
SAR	1.36
CLASIFICACION	C3-S1
Duro ppm	2.06

Figura 28: Análisis de agua del canal



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DRH
LABORATORIO DE AGUA, SUELO, MEDIO AMBIENTE Y FERTIRRIEGO
 Av. La Molina s/n. Telefax: 6147800 Anexo 226 Lima. E-mail: las-fia@lamolina.edu.pe



Nº 012031

Análisis de Suelo - Salinidad y Sodicidad

SOLICITANTE : LIA RAMOS FERNANDEZ
PROYECTO : Proyecto arroz
PROCEDENCIA : UNALM - Parcela
RESP. ANALISIS : Ing. Elizabeth Monterrey Pomas
FECHA DE ANALISIS : La Molina, 13 de febrero del 2017

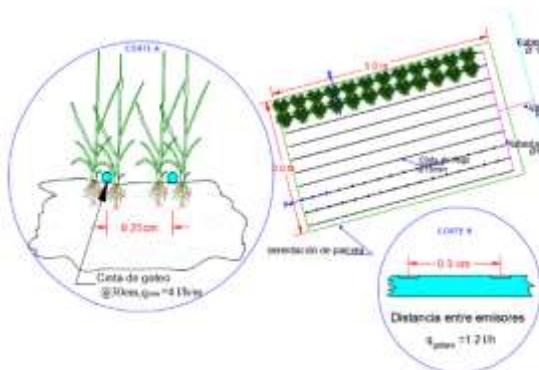
Número de muestra		CE	Análisis Mecánico				pH	MO	P	K ₂ O	CaCO ₃	Cationes					
Lab.	Campo	45 / m Resolón 1:1	Arena %	Limo %	Arcilla %	Textura	Relación 1:1	%	ppm	ppm	%	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ⁺⁺⁺	
Cmho (cm) / Kg																	
12031	Suelo	1.34	52.04	31.25	16.68	Franco arenoso	7.75	2.30	62.54	230.00	1.18	21.92	8.99	1.30	0.27	0.09	-

MUESTRA		Salinidad	pH	C.E.	DATOS SOLUBLES (mg/L)					ANIONES SOLUBLES (mg/L)					Yeso	Som.	
Lab.	Campo	%	Suelo Agua 1:2	dS/m 1:2	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	SUMA	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	CO ₃ ⁻²	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	SUMA	Sulfate %	Sulfate ppm
12031	Suelo	46.00	7.04	2.05	16.73	2.32	1.03	5.77	26.34	8.63	12.60	0.00	4.96	0.00	26.29	0.55	2.41

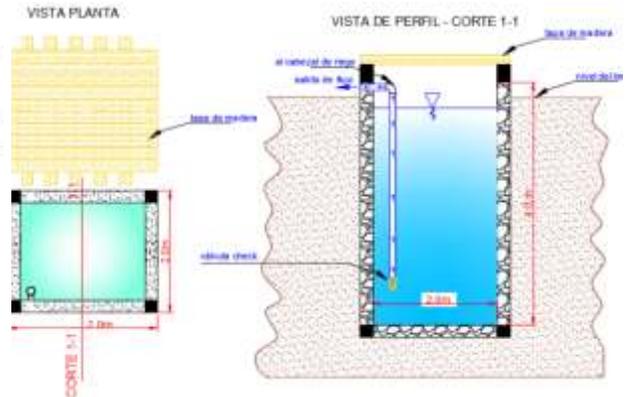
Parámetros Hidroce	
Ce (%)	16.89
Ppm (%)	8.99

Figura 29: Análisis de suelo – salinidad y sodicidad

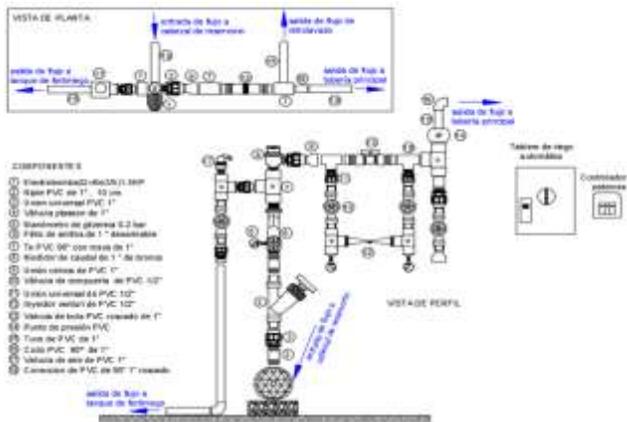
ANEXO 7: SISTEMA DE RIEGO EN EL ÁREA EXPERIMENTAL DE RIEGO (AER)



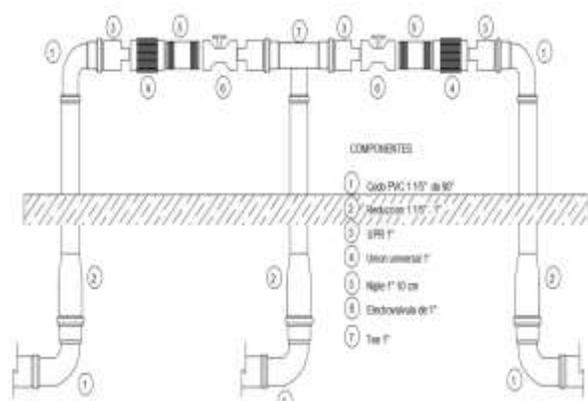
a. Detalle de la cinta de riego



b. Detalle del pozo del AER



c. Detalle del cabezal



d. Detalle del arco de riego



e. Vista de las cintas en la parcela



f. Funcionamiento del cabezal del AER

Figura 30: Componentes del sistema de riego del AER

ANEXO 8: RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO AQUACROP

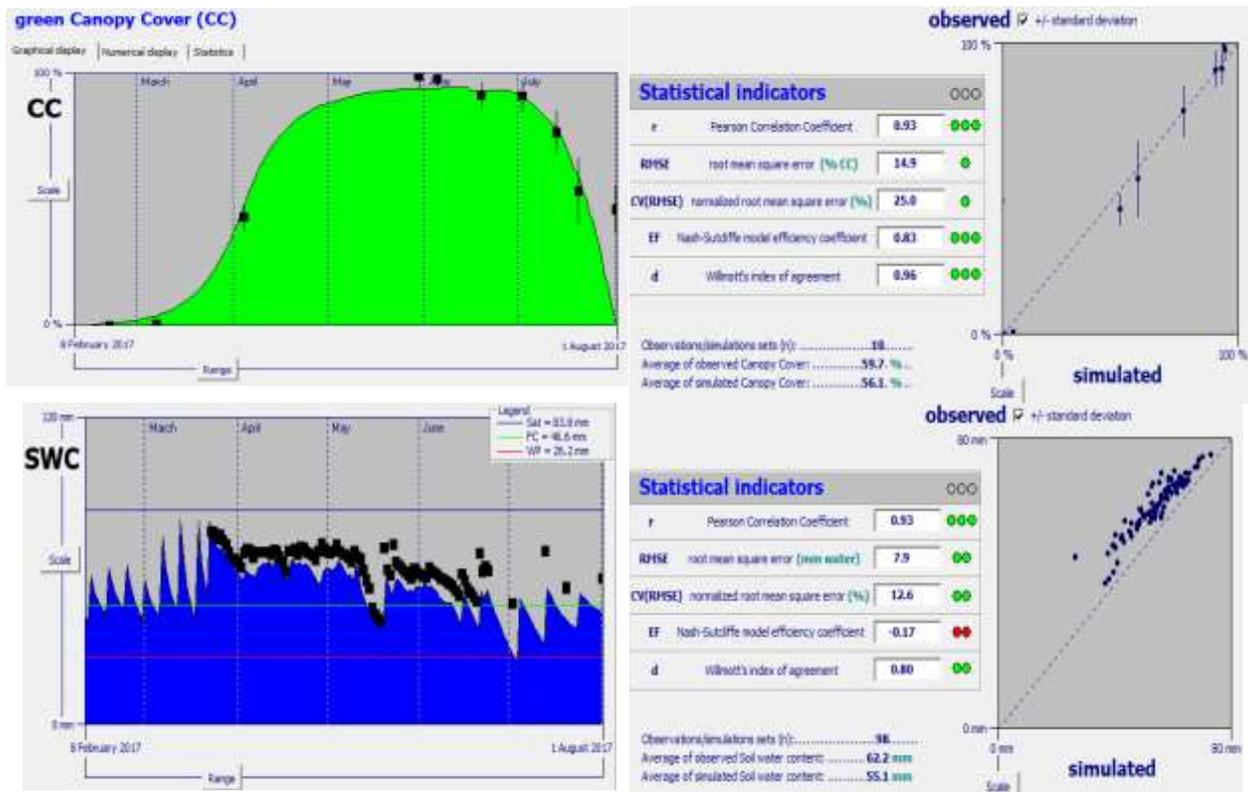


Figura 31: Análisis cobertura del dosel y humedad del suelo

Nota: Datos observados, simulados e indicadores estadísticos de eficiencia del modelo.