

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRIA EN RIEGO Y DRENAJE



**“CALIBRACIÓN DE MODELO AGROMETEOROLÓGICO
AQUACROP PARA EVALUAR EL RENDIMIENTO DEL
ARROZ BAJO RIEGO INUNDADO CON ALTERNANCIA DE
HUMEDECIMIENTO Y SECADO”**

Presentada por:

MILLER ALEXANDER MELO SOLARTE

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO MAGISTER
SCIENTIAE EN RIEGO Y DRENAJE**

LIMA – PERU

2019

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRIA EN RIEGO Y DRENAJE**

**“CALIBRACIÓN DE MODELO AGROMETEOROLÓGICO
AQUACROP PARA EVALUAR EL RENDIMIENTO DEL ARROZ
BAJO RIEGO INUNDADO CON ALTERNANCIA DE
HUMEDECIMIENTO Y SECADO”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO MAGISTER
SCIENTIAE EN RIEGO Y DRENAJE**

Presentada por:

MILLER ALEXANDER MELO SOLARTE

Presentada y aprobada por el siguiente jurado

Ph.D. Absalón Vásquez Villanueva
PRESIDENTE

Dra. Lía Ramos Fernández
ASESOR

Mg.Sc. Luis Rázuri Ramírez
MIEMBRO

Mg.Sc. Edgardo Alaluna Gutiérrez
MIEMBRO

DEDICATORIA

A mis padres Luceny Solarte y Jesús Melo

A Mis hermanos Camilo y Lisbeth Melo Solarte

Por su apoyo y comprensión

Asimismo, por ser el motor de mi vida para lograr mis metas y propósitos

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme fortaleza y guiarme por el buen camino.

A mis padres por el apoyo incondicional que siempre me brindaron a lo largo de mi formación personal y profesional.

A Perú y a la Universidad Nacional Agraria La Molina por brindarme la oportunidad de crecer profesionalmente

Al Proyecto “Uso de sensores remotos para determinar índice de estrés hídrico en el mejoramiento del manejo de riego de arroz (Oriza sativa) en zonas áridas, para enfrentar al cambio climático” Convenio N° 008-2016-INIA-PNIA/UPMSI/IE, y al grupo DANI “Teledetección y cambio climático a los recursos hídricos y a la agricultura” por permitirme realizar mi proyecto de grado.

A mi asesora Dra. Lía Ramos, por compartir sus conocimientos y consejos que permitieron culminar esta investigación.

A mi Presidente y miembros del jurado por compartir sus conocimientos y recomendaciones.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. ANTECEDENTES.....	3
2.2. CULTIVO DE ARROZ.....	5
2.2.1. Fenología.....	5
2.2.2. Manejo del cultivo de arroz.....	8
2.2.3. Estrés hídrico.....	9
2.3. MODELOS DE CULTIVOS.....	11
2.3.1. Modelo agrometeorológico Aquacrop.	12
2.3.2. Dinámicas de la respuesta del cultivo al estrés hídrico en Aquacrop	20
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
3.1. UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	22
3.1.1. Caracterización climática	23
3.1.2. Caracterización edáfica	23
3.1.3. Caracterización del agua de riego	25
3.2. MATERIALES Y EQUIPOS	26
3.2.1. Sistema de riego	26
3.3. PROCEDIMIENTO	34
3.3.1. Fase experimental.....	34
3.3.2. Caracterización del cultivo.....	34
3.4.2. Identificación de parámetros del modelo y análisis de sensibilidad.	36
3.4.3. Calibración de modelo Aquacrop.....	38
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	40
4.1. CARACTERIZACIÓN DE CULTIVO	40

4.1.1. Fenología del cultivo y grados día de desarrollo	40
4.1.2. Rendimiento y biomasa en la cosecha.....	42
4.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO AQUACROP	46
4.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO AQUACROP	49
V. CONCLUSIONES	55
VI. RECOMENDACIONES	56
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	57
VIII. ANEXOS	64

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Comparación entre sistema intensivo y sistema convencional en el cultivo de arroz.....	9
Cuadro 2: Análisis físico-químico del suelo.....	24
Cuadro 3: Materiales y equipos.....	26
Cuadro 4: Tensión de humedad del suelo según tratamientos.....	29
Cuadro 5: Labores culturales del cultivo.....	30
Cuadro 6: Parámetros para el análisis de sensibilidad en el modelo Aquacrop.....	37
Cuadro 7: Criterios para la evaluar la eficiencia de la calibración del modelo.....	38
Cuadro 8: Fenología del cultivo en diferentes regímenes de agua expresada DDT y GDD.....	41
Cuadro 9: Rendimiento de arroz en cáscara.....	42
Cuadro 10: Peso de mil granos llenos.....	44
Cuadro 11: Acumulación de materia seca (Biomasa).....	45
Cuadro 12: Profundidad de raíz.....	45
Cuadro 13: Balance hídrico del modelo Aquacrop.....	46
Cuadro 14: Índices de eficiencia de la calibración del modelo de cultivos Aquacrop para diferentes tensiones de humedad del suelo.....	50
Cuadro 15: Biomasa, rendimiento e índice de cosecha observado y simulado.....	50
Cuadro 16: Parámetros calibrados del cultivo de arroz genotipo IR 71706, bajo diferentes niveles de tensión de humedad del suelo.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estado fenológico del cultivo de arroz.....	7
Figura 2: Efecto del estrés hídrico en el rendimiento del cultivo de arroz.....	11
Figura 3: Esquema de funcionamiento del modelo Aquacrop.....	14
Figura 4: Interfaz principal del modelo Aquacrop.....	15
Figura 5: Variación temporal de la cobertura del dosel de un cultivo.....	19
Figura 6: Curva del coeficiente de estrés hídrico (Ks) según la expansión del dosel (exp), conductancia estomática (sto), y senescencia del dosel (sen).....	21
Figura 7: Ubicación de la investigación.....	22
Figura 8: Variabilidad temporal de la humedad relativa, temperatura máxima, temperatura minina, temperatura media y precipitación del 15 de noviembre del 2017 al 21 de abril del 2018 en el Área Experimental de Riego de la UNALM.....	23
Figura 9: Diagrama radial del análisis químico del agua de riego.....	25
Figura 10: Sistema de riego inundado con red de distribución de agua.....	27
Figura 11: Vista de planta del cabezal de riego del Área Experimental de Riego (AER).....	28
Figura 12: Diseño experimental y distribución de tratamientos.....	29
Figura 13: Curva de calibración de la humedad volumétrica (%) y la lectura del sensor FDR (%) a una profundidad de 0.2m.....	31
Figura 14: Curva de calibración de la humedad volumétrica (%) y la tensión de humedad del suelo (Bar).....	32
Figura 15: Variación temporal de la humedad volumétrica del suelo según diferentes regímenes de tensión del agua en el suelo.....	33
Figura 16: Tratamientos de riego con inundación continua y con alternancia de humedecimiento y secado.....	34
Figura 17: Imágenes de la cobertura del dosel clasificadas mediante el software ERDAS IMAGINE 2014 en: macollamiento (a), máximo dosel (b) e inicio del llenado de grano (c).....	35
Figura 18: Fenología del cultivo de arroz según GDD acumulados y DDT. Fases fenológicas según Yzarra y López (2012)	40

Figura 19: Barras de la media del rendimiento $t\ ha^{-1}$ y box plot de la desviación estándar (panel izquierdo) y peso de mil granos g (panel derecho), con matriz que representa el grado de significancia según prueba de Tukey.....	43
Figura 20: Barras de la media de biomasa $t\ ha^{-1}$ y box plot de desviación estándar (panel izquierdo) y profundidad de raíz m (panel derecho), con matriz que representa el grado de significancia según prueba de Tukey.....	44
Figura 21: Parámetros de alta sensibilidad del modelo para rendimiento y biomasa en el cultivo de arroz.....	47
Figura 22: Parámetros de moderada sensibilidad del modelo para rendimiento y biomasa en el cultivo de arroz.....	48
Figura 23: Parámetros de baja sensibilidad del modelo para rendimiento y biomasa en el cultivo de arroz.....	49
Figura 24: Variación temporal de la cobertura del dosel simulada y observada (%) durante la temporada de desarrollo del cultivo de arroz para diferentes tensiones de humedad del suelo.....	50
Figura 25: Porcentaje de reducción del coeficiente del estrés hídrico (K_s) por: reducción de la expansión del dosel (a) cierre estomático (b) y adelanto de senescencia (c).....	53
Figura 26: Variación de la curva del coeficiente de estrés hídrico (K_s) por: expansión del dosel (K_{sexp}), cierre estomático (K_{ssto}), y senescencia del dosel (K_{ssen})...	54

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Análisis del agua de riego proveniente del reservorio Área Experimental de Riego y del reservorio del campo ferial UNALM.	64
ANEXO 2: Análisis del suelo.....	66
ANEXO 3: Condiciones meteorológicas: temperatura máxima y mínima, ($^{\circ}$ T), precipitación (Pp), -humedad relativa (HR) y evapotranspiración (mm).	67
ANEXO 4: Análisis estadístico.	71
ANEXO 5: Grado de la cobertura del dosel (CC) (%).	73
ANEXO 6: Fenología del cultivo de arroz bajo tensión de humedad del suelo de 0.15 bares (T1) y 0.30 bares (T2)	74
ANEXO 7: Simulación del modelo Aquacrop para tensión de humedad del suelo, 0, 0.15 y 0.30 bares	76
ANEXO 8: Simulación del balance hídrico del modelo Aquacrop para tensión de humedad del suelo, 0, 0.15 y 0.30 bares	77
ANEXO 9: Panel fotográfico	79

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

Acrónimo

AER	Área Experimental de Riego
B	Biomasa seca
CC	Cobertura del dosel
CC ₀	Cobertura del dosel inicial
DDT	Días después de trasplante
Y	Rendimiento final (Siglas en inglés)
HI	Índice de cosecha (Siglas en inglés)
PER	Profundidad efectiva de raíz (Siglas en inglés)
WP*	Productividad del agua del cultivo para biomasa (Siglas en inglés)
Ks	Coefficiente de estrés hídrico
Kc	Coefficiente de cultivo
ET ₀	Evapotranspiración de referencia
CO ₂	Concentración de dióxido de carbono en la atmosfera
T _{max} y T _{min} :	Temperaturas diarias Máxima y Mínima
AWD	Humedecimiento y secado alternativo (Siglas en inglés)
CF	Inundación continua (Siglas en inglés)
FDR	Reflectometría en el dominio de frecuencia
GDD	Los grados-día de crecimiento acumulado (Siglas en ingles)
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura (siglas en inglés)
INEI	Instituto Nacional de Estadística e informática
MINAGRI	Ministerio de Agricultura y Riego
IRRI	Instituto Internacional de Investigación sobre el Arroz (Siglas en inglés)
CIAT	Centro Internacional de Agricultura Tropical
SA	Análisis de sensibilidad (Siglas en inglés)
θ Sat	Porcentaje de Saturación
θ cc	Humedad a capacidad de campo
θ Pmp	Humedad a punto de marchitez permanente

RESUMEN

En el Perú, el cultivo de arroz se ha visto afectado por el cambio climático, poniendo en riesgo la seguridad alimentaria de la población. En la presente investigación se evaluó el desempeño del modelo Aquacrop en el cultivo de arroz bajo la técnica de riego inundado con alternancia de humedecimiento y secado, ante dos niveles de potencial hídrico en el suelo durante la etapa de macollamiento, desarrollada en el Área Experimental de Riego de la UNALM durante el 15 de noviembre del año 2017 y el 21 de abril del año 2018. El diseño experimental que se utilizó fue el de bloques completamente al azar con dos tratamientos T1 y T2 (0.15 y 0.30 bares, respectivamente, y un testigo (T0) bajo inundación, con tres repeticiones. El material vegetal utilizado fue el genotipo IR 71706 desarrollado por el Instituto Internacional de Investigación sobre el Arroz (IRRI) - Philippines para ser cultivado en zonas áridas con problemas de sequía. Para la variable rendimiento no existieron diferencias significativas entre tratamientos, con rendimiento medio de $7.73 \pm 0.74 \text{ t ha}^{-1}$. Para la calibración del modelo, la eficiencia se evaluó mediante los siguientes indicadores: coeficiente de correlación de Pearson (R), raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE), eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (EF) y el índice de Willmott (d), obteniéndose valores de NRMSE ~ 9.7 a 12.6 %, EF ~ 0.93 a 0.96, d ~ 0.98 a 0.99 y un R ~ 0.97 a 0.98, el cual es significativo para un $\alpha = 5\%$, con un desempeño de “Muy bueno” a “Bueno” respecto a la cobertura del cultivo. Por lo tanto, el modelo Aquacrop es una herramienta que puede ser utilizada para simular el rendimiento del cultivo de arroz, asimismo, para la toma de decisiones por parte de los productores para maximizar los beneficios.

Palabras claves: Aquacrop, Potencial hídrico del suelo, Sequía.

ABSTRACT

In Peru, rice cultivation has been affected by climate change, putting the population's food security at risk. In the present investigation, the performance of the Aquacrop model was evaluated in the cultivation of rice under the flooded irrigation technique with alternation of humidification and drying, before two levels of water potential in the soil during the stage of macollación, developed in the Experimental Area of Irrigation of UNALM during November 15, 2017 and April 21, 2018. The experimental design that was used was that of completely randomized blocks with two treatments T1 and T2 (0.15 and 0.30 bars, respectively, and a T0 control under flood, with three repetitions. The plant material used was genotype IR 71706 developed by the International Rice Research Institute (IRRI) - Philippines to be cultivated in arid areas with drought problems. For the yield variable there were significant differences between treatments, with an average yield of $7.73 \pm 0.74 \text{ t ha}^{-1}$. For the calibration of the model, the efficiency s and evaluated using the following indicators: Pearson's correlation coefficient (R), root of the standardized mean square error (NRMSE), efficiency of the Nash-Sutcliffe model (EF) and the Willmott index (d), obtaining NRMSE values ~ 9.7 to 12.6% , EF ~ 0.93 to 0.96 , d ~ 0.98 to 0.99 and an R ~ 0.97 to 0.98 , which is significant for an $\alpha = 5\%$, with a performance of “Very good” to “Good” with respect to crop cover. Therefore, the Aquacrop model is a tool that can be used to simulate the yield of rice cultivation, as well as for decision-making by producers to maximize profits.

Keywords: Aquacrop, Water potential in the soil, Drought

I. INTRODUCCIÓN

Los efectos del cambio climático a nivel global obligan al sector agrícola a buscar alternativas que garanticen el desarrollo de la sociedad, estas serían cruciales para garantizar la calidad de vida de la población futura. En el ámbito agrícola se enfrentan importantes desafíos que deben ser afrontados con mucha responsabilidad. Es así que, el cambio climático está afectando la producción de diversos cultivos; por ello, se busca nuevas tecnologías para producir más alimentos utilizando los recursos disponibles de manera eficiente y sostenible.

Por ejemplo, el arroz es fundamental en la seguridad alimentaria en el mundo; constituye la principal fuente de aporte calórico para aproximadamente la mitad de la población mundial. En América latina, el Perú es el país con mayor consumo de este cereal con 60 kg / persona/año, (El-Habbal *et al.* 2017). En la costa del país el cultivo arroz se da aplicando una técnica de riego cuya característica principal es el uso ineficiente del agua, siendo esta el riego por inundación. Se puede llegar a emplear 2,800 litros de agua para producir 1 kg de arroz, que equivale a 20,000 m³ ha⁻¹ con una producción media de 7,200 kg ha⁻¹ de arroz en cascara (Heros 2013; MINAGRI 2018).

Ante la escasez del recurso hídrico en especial para el sector agrícola, el riego del cultivo de arroz mediante la técnica de riego por inundación se hace insostenible en el tiempo. Es por eso que la búsqueda de nuevas tecnologías, como el modelo de productividad del agua llamado Aquacrop, es de vital importancia.

El modelo Aquacrop previamente calibrado, permite simular el rendimiento de cultivos influenciados por factores como cantidad de agua transpirada, la cobertura vegetal, el clima, la fertilización, los patógenos y la humedad del suelo. Ante esto el modelo Aquacrop permite optimizar el rendimiento del cultivo, donde el agua y factores climáticos actúan como limitante para una óptima producción agrícola (Raes *et al.* 2017).

Actualmente se están trabajando en nuevas tecnologías de riego, como la inundación con alternancia de humedecimiento y secado, cuyo fin es el ahorro de agua (Chu *et al.* 2018); que junto a materiales genéticos tolerantes a condiciones edafoclimáticas extremas, así como de modelos agrometeorológicos, ayudarán a una mejor toma de decisiones por parte de los productores con el fin de obtener rendimientos rentables.

En esta investigación se buscó evaluar el rendimiento del cultivo de arroz genotipo IR-71706, empleando el modelo agrometeorológico Aquacrop bajo la técnica de riego por inundación con alternancia de humedecimiento y secado en áreas experimentales del campus de la Universidad Nacional Agraria la Molina UNALM.

OBJETIVOS

El objetivo general de la presente investigación es Evaluar el desempeño del modelo Aquacrop en el cultivo de arroz bajo riego inundado con alternancia de humedecimiento y secado en condiciones áridas de La Molina, Lima-Perú. Objetivo que se cumplió a través de los siguientes Objetivos específicos:

- Caracterizar el cultivo en cuanto a los grados día de desarrollo (GDD), rendimiento, biomasa, índice de cosecha, profundidad de raíz, EUA y cobertura del dosel.
- Realizar el análisis de sensibilidad del modelo Aquacrop e identificar parámetros más sensibles
- Simular el rendimiento del cultivo de arroz para diferentes condiciones de tensión de humedad del suelo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES.

El consumo de grandes volúmenes de agua en el cultivo de arroz se asocia directamente a las malas prácticas agrícolas en torno al manejo del agua y a la ineficiencia del riego por gravedad (Kato y Katsura 2014).

Las tecnologías de riego para alternar la humedad y el secado (Alternate Wetting Drying, AWD), consisten en inundar el campo hasta obtener una lámina de dos cm por encima de la superficie del suelo y posteriormente se deja secar. De esta forma, se alternan períodos de inmersión con períodos de no inmersión durante la temporada del crecimiento. El proceso se lleva a cabo desde diez a quince días después de trasplante hasta el inicio de la etapa floración del cultivo (González y Alonso 2017).

Se realizó una comparación entre la tecnología de inundación continua (CF), respecto a la de humedecimiento y secado (AWD), y se encontró que la técnica AWD reduce la lámina de agua aplicada sin una reducción significativa del rendimiento (Chu *et al.* 2018).

Maniruzzaman *et al.* (2015) indican que los valores del coeficiente de crecimiento variaron con diferentes regímenes de agua, mientras que el coeficiente de disminución del dosel se mantuvo igual. Sin embargo, los días para alcanzar la máxima cobertura de dosel (CC), así como los días necesarios para alcanzar la senescencia y la madurez, variaron ligeramente. El inicio de la floración se dio entre los días 42 y 46 después del trasplante, con un período de 10 días de duración. Además, con el tratamiento de riego tres días después de la desaparición de lámina, se logró un valor de 97 por ciento de cobertura del dosel, siendo este el valor máximo dado a la mitad de la etapa de floración. La máxima profundidad de raíz fue de 0.45 m para todos los tratamientos.

Según Maniruzzaman *et al.* (2015) Aquacrop fue calibrando mediante parámetros cobertura de dosel (%) y biomasa ($t\ ha^{-1}$), indicando un coeficiente de correlación de Pearson ($R = 0.94 - 0.99$). con lo que se mostró una buena correlación entre lo observado y simulado. además, con el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (EF: 0.83–0.95) se obtuvo una calificación de desempeño de “Muy bueno” (ver Cuadro 7).

Bajo un sistema de siembra directa, con tasa de siembra de $120\ k\ ha^{-1}$, con temperaturas base y umbral máxima de 10 y 30 °C respectivamente, se diferenció una cobertura de dosel al inicio de 4.52 por ciento, y máxima del 75 por ciento el cual se logró a los 55 días después de la siembra. La etapa de floración conto con 13 días de duración, mientras la senescencia y maduración del cultivo se presentaron a los 95 y 118 días después de siembra. El volumen de agua de riego aplicado por campaña se mantuvo entre 800 y 1200 mm dependiendo de la variedad (Sethi *et al.* 2016).

Con una densidad de siembra de 250,000 plantas. ha^{-1} , Pirmoradian y Davatgar (2019) obtuvieron una cobertura de dosel inicial de 1.25 por ciento y una máxima del 90 por ciento la cual se logró al acumular 525 grados día de desarrollo (GDD), mientras que la senescencia y maduración se obtuvieron acumulando 1,090 y 1,410 GDD respectivamente, con una profundidad radicular efectiva de 0.3 metros.

La simulación de la cobertura del dosel, biomasa y rendimiento con el modelo presentan una buena simulación ver Cuadro 7, constatada por la raíz de cuadrado medio normalizado, (NRMSE <10%), y EF > 0.98 (ver Cuadro 7). Asimismo, la eficiencia de Nash-Sutcliffe (EF-0.25) indica una mejor predicción en los datos observados que en los datos simulados para la percolación profunda (DP) (Pirmoradian y Davatgar 2019).

La parametrización del modelo en el Este de China, obtuvo una cobertura del dosel máxima 97 por ciento, dada a los 47 días después de trasplante (DDT). Los períodos de senescencia y maduración se lograron a los 66 y 117 días DDT, respectivamente; mientras la floración continuó por 13 días. La profundidad radicular máxima alcanzada fue de 0.4 metros, con un índice de cosecha (HI) de 42 por ciento (Xu *et al.* 2019).

Según la calibración el modelo simuló la cobertura del dosel de arroz (CC), la evapotranspiración (ET), la biomasa y el rendimiento con una precisión con una calificación

desempeño “Muy bueno”, indicada por los parámetros de ajuste ($EF > 0.96$; $NRMSE < 10\%$; $d > 0.96$) ver Cuadro 7. (Xu *et al.* 2019).

2.2. CULTIVO DE ARROZ

El arroz es el alimento básico para más de la mitad de la población que representa alrededor de 3,000 millones de personas en todo el mundo. Actualmente existen aproximadamente 167 millones de hectáreas dedicadas únicamente a la producción de arroz, mediante prácticas de riego por inundación y secano FAO (2018). La producción del año 2018 fue de 515 millones de toneladas de arroz en cascara, sobrepasando en un 1.6 por ciento la producción del año anterior (FAO 2019).

En el Perú, según el Instituto Nacional de Estadística e Informática INEI (2019), la producción nacional de arroz en cascara en el año 2018 fue de 171,207 toneladas, cifra superior en un 19 por ciento con respecto al 2017. Al ser uno de los cereales más sembrados en el país, con 414,001 hectáreas, la superficie de siembra disminuyendo en seis por ciento con respecto al período 2017-2018 (MINAGRI 2018), a causa de los altos costos de producción generando una utilidad media de 2,197 soles por hectárea (INEI 2019). Por otro lado, en el Perú, el consumo per cápita de arroz es de 60 kg.año⁻¹, posicionándose como uno de los principales alimentos de la canasta familiar del país (El-Habbal *et al.* 2017).

2.2.1. Fenología

Según Yzarra y López (2012), el crecimiento fenológico del cultivo de arroz está caracterizado por las siguientes etapas:

a. Fase vegetativa

- Germinación: Inicia cuando la dormancia de las semillas se rompe, esto se logra mediante la absorción de una adecuada cantidad de agua y la exposición a temperaturas entre 20-40°C, siendo el rango de temperatura óptima entre 30-35 °C (Olmos 2007).
- Plántula: Desde germinación hasta la aparición del primer macollo, apta para trasplante, con presencia de cuatro hojas verdaderas.
- Elongación de tallo: El cuarto entrenudo del tallo principal, empieza a hacerse notable en longitud, y va hasta el inicio de la panoja (Yzarra y López 2012).

- Macollaje: Brota el primer macollo a partir de la yema axilar en uno de los nudos inferiores de las plantas. Se inicia cuando el brote presenta un centímetro de longitud hasta el primordio floral. Los factores que afectan el macollamiento son el genotipo, la lámina de agua (menores a 10 cm), la fertilidad del suelo, las condiciones sanitarias (incluyendo competencia de malezas) y la temperatura del ambiente. Es así que los valores menores a 15 °C y mayores a 34 °C paralizan el macollamiento, encontrando una temperatura óptima entre 32-34 °C (Olmos 2007).

b. Etapa reproductiva

- Inicio de panícula: Se aprecia un cono blanco veloso de 1.0 a 1.5 mm (punto de algodón) (CIAT 1985).
- Desarrollo de panícula: Se diferencian las espiguillas, y el raquis forma la inflorescencia que crece dentro de la vaina de la hoja bandera (embuchamiento) (CIAT 1985).
- Floración: La panícula emerge de la hoja bandera e inicia el proceso de fecundación, el que ocurre en horas de la mañana y mediodía, debido a la presencia de mayor temperatura en un período de tiempo de 6 horas. Para que una panícula complete su proceso de anthesis necesita de 7 a 10 días, con temperaturas que no se encuentren por debajo de los 12 °C, ya que pueden provocar vaneo (aborto floral) (Olmos 2007).

c. Etapa de maduración

- Maduración lechosa: Los granos presentan un líquido lechoso al ser presionados con los dedos.
- Maduración pastosa: Comprende desde la finalización de la etapa lechosa hasta el inicio de la etapa pastosa, que es cuando el grano cambió de color verde a verdoso amarillento. La consistencia que presenta es pastosa suave (Degiovanni *et al.* 2004)
- Maduración de la córnea: Los granos al ser presionados están duros y muestran un color amarillo pálido. La planta entera esta fisiológicamente madura, las dos hojas remanentes en todos los tallos por lo general están marchitas. Esto puede variar según el genotipo (CIAT 1985).

La Figura 1 indica las etapas fenológicas del cultivo del arroz desde emergencia a madurez fisiológica.



Figura 1: Estado fenológico del cultivo de arroz

Fuente: Área Experimental de Riego de la UNALM

El desarrollo de la planta de arroz desde el trasplante (plántula) hasta la madurez está determinada por períodos y características propias, con desarrollo y diferenciación de órganos específicos en cada etapa. La duración de cada etapa depende de la variedad, del lugar de producción y las condiciones climáticas, siendo específicamente de las horas luz y la temperatura (Degiovanni *et al.* 2004).

Los grados-día de desarrollo (GDD), es un índice utilizado para caracterizar el desarrollo de las plantas y predecir la madurez fisiológica, fecha de cosecha y siembras oportunas (Qadir *et al.* 2007; Clay *et al.* 2006).

Según Esteves *et al.* (2008); Murray (2008), para el cálculo de los GDD se emplea el método de onda senoidal, el cual ofrece mayor precisión en el cálculo ya que utiliza la temperatura máxima y mínima junto con la temperatura base. Como se expresa en las ecuaciones 1 y 2.

$$GDD = \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) - T_b \quad (1)$$

$$T_{max} < T_s \text{ y } T_{min} > T_b \quad (2)$$

Dónde: GDD, grados-día de desarrollo, T_{max} y T_{min} : temperaturas diarias máximas y mínimas respectivamente, T_b , es la temperatura base inferior y T_s es la temperatura base superior del cultivo.

Una temperatura menor de 10 °C así como una superior a 30 °C, pueden indicar problemas con respecto al adecuado desarrollo fisiológico del arroz (Steinmetz *et al.* 2005).

2.2.2. Manejo del cultivo de arroz

El establecimiento del cultivo, en la mayoría de zonas arroceras del mundo se realiza por medio del trasplante. En América del Sur, el sistema de siembra predominante es siembra directa. En el Perú, por la carencia de mano de obra, así como por el aumento del costo de producción y del incremento de áreas de siembra, se registra un aumento en la tendencia a cambiar el sistema de trasplante por el sistema de siembra directa en más del 60 por ciento de las áreas arroceras (Heros 2013).

El Instituto Internacional de Investigación sobre el Arroz (IRRI), estima que “hacia el año 2025, el número de personas que dependan del arroz como principal fuente de alimentación aumentará en más del 40 por ciento, pasando de 2,700 millones a 3,900.00 millones”. Para satisfacer esa demanda, se necesitara que las políticas gubernamentales así como las prácticas agrícolas se enfoquen en un aumento de la producción de arroz pero de manera sostenible (FAO 2010).

IICA *et al* (2015) menciona los principios del sistema intensivo del cultivo de arroz:

- Manejo eficiente del agua mediante riegos intermitentes, evitando el estrés hídrico y alternando suelos secos con suelos aeróbicos no inundados.
- Trasplante de plántulas individuales y saludables.
- Minimización de la competencia entre las plantas, incrementando el espaciamiento entre ellas, por ejemplo, 25 cm.
- Favorecimiento de la fertilidad y biota de los suelos aplicando materia orgánica.

El Cuadro 1 muestra la comparación entre un cultivo de arroz bajo sistema convencional (inundación) y bajo sistema intensivo.

Cuadro 1: Comparación entre sistema intensivo y sistema convencional en el cultivo de arroz

Sistema intensivo	Sistema convencional
Trasplante a edad temprana, con un período de ocho a doce días a partir de la emergencia de la segunda hoja de la planta.	Siembra directa o trasplante de plántulas dentro de un período de 21 a 40 días.
Trasplante 25 cm como mínimo y 50 cm como máximo entre las plántulas y entre hileras.	Plántulas ubicadas muy cerca unas de las otras y espaciadas al azar.
Una sola plántula en cada punto de la siembra.	Múltiples plántulas colocadas juntas en cada punto de siembra
Riegos intermitentes y sin inundación hasta floración y con lámina de agua permanente en llenado de granos con una lámina de agua de 1 a 2 cm.	Inundación continua durante todo el ciclo del cultivo (láminas de agua de 5 a 10 cm de altura en la mayoría de los casos).
Mayor uso de fertilizantes orgánicos y microorganismos. En caso de necesidad se aplican fertilizantes químicos.	Amplio uso de fertilizantes químicos.
Uso de deshierbadores mecánicos y manejo integrado de plagas y enfermedades (MIPE)	Alta dependencia de agroquímicos y de la inundación del terreno para controlar malezas, insectos y enfermedades.

Fuente: IICA *et al* (2015)

2.2.3. Estrés hídrico

La sequía causa pérdidas totales de cultivares de arroz obligando a productores a implementar prácticas de pastoreo. El Perú ha sido afectado por la última ola de sequía del año 2015, causando pérdidas económicas por la disminución del rendimiento en varios cultivos (Sandhu y Kumar 2017).

El punto de estrés hídrico del arroz está determinado principalmente por la variedad cultivada, la edad o etapa fenológica de la planta, la duración de la época de estiaje y el tipo de suelo. Las alteraciones que se pueden producir se enfocan en el crecimiento vegetativo y floración, interrupción de la iniciación del flósculo causando con esto esterilidad de espiguillas y llenado de grano, así como en la disminución del contenido de clorofila de la hoja bandera afectando la capacidad fotosintética. Esto se puede traducir en una disminución del peso del grano obteniéndose bajos rendimientos. (Sandhu *et al.* 2019).

Otro de los problemas generados por el estrés hídrico es el cierre de estomas, es por esto que, bajo estas condiciones, las etapas fenológicas como: inicio de panícula, floración y maduración presentan disminución de la conductancia estomática. El cierre de estomas se presenta como un mecanismo de defensa de la planta para evitar la pérdida de agua por medio de las estomas (transpiración). Este mecanismo interrumpe el intercambio de CO₂ afectando la acumulación de materia seca y como consecuencia directa el rendimiento. Por

ejemplo, en el estudio bajo estrés hídrico en la etapa reproductiva realizado por Zaman *et al.* (2018) indica que el estrés hídrico afecta significativamente el número de panículas, y el rendimiento por tamaño de grano.

Un efecto indirecto es la susceptibilidad a la competencia por nutrientes con maleza presente (estrés biótico), sumado a la germinación de grano en la panícula, incidencia de enfermedades como la mancha parda (*Bipolaris oryzae*), el tizón bacteriano (*Cyperus L*) y el yellow mosaic virus (Sandhu *et al.* 2019).

Otros efectos pueden ser: el aumento de la tasa de transpiración, detención del crecimiento como técnica de supervivencia, la reducción del crecimiento debido al bajo desarrollo radicular, hojas reducidas con capa cerosa y pubescencia foliar de tono amarillento disminuyendo la tasa fotosintética.

La tolerancia de plantas al estrés hídrico se debe a la acumulación del ácido abscísico (ABA). El ABA actúa como regulador del crecimiento estimulando enzimas antioxidantes, mejorando así el transporte de proteínas, incluyendo el metabolismo del carbono y la síntesis de proteínas de resistencia. La aplicación del ABA en arroz potencia la recuperación de la tasa fotosintética y la transpiración, regulando la conductancia estomática (Pandey y Shukla 2015).

Según Pandey y Shukla (2015), el estrés hídrico en el cultivo de arroz afecta el rendimiento bajo diferentes parámetros fenológicos y fisiológicos. Ver Figura 2.

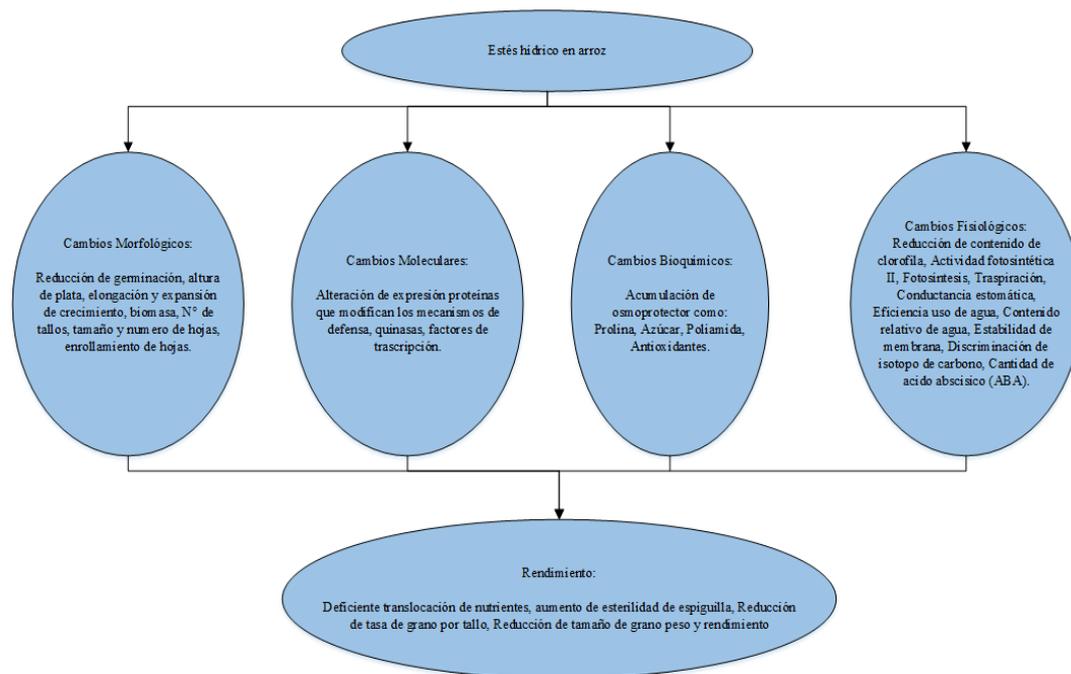


Figura 2: Efecto del estrés hídrico en el rendimiento del cultivo de arroz

Fuente: Pandey y Shukla (2015)

2.3. MODELOS DE CULTIVOS.

Los modelos de cultivo son herramientas que permiten la observación del efecto que puede generar el cambio climático sobre algunas características como respuesta a la variación de las condiciones para el cultivo, como factores bióticos y abióticos mediante la rezoñificación de áreas productoras y el mejoramiento genético (Zhao *et al.* 2019). Dentro de las aplicaciones directas de los modelos de cultivo se encuentran estudios complejos del clima, causados por emisiones de gases de efecto invernadero que afectan directamente el rendimiento. (Tubiello y Ewert 2002).

En los últimos años se han desarrollado modelos de simulación múltiple, que gracias al desarrollo de la informática han podido aplicarse en todos los niveles. Estos se han focalizado en cultivos como trigo (Asseng *et al.* 2013), maíz (Bassu *et al.* 2014), arroz (Li *et al.* 2014), y papa (Fleisher *et al.* 2016).

Según Steduto *et al.* (2012), los modelos de crecimiento de cultivo se pueden clasificar en: (i) impulsados por carbono, (ii) impulsados por radiación e (iii) impulsados por agua.

Los modelos impulsados por agua establecen una relación lineal entre la tasa de crecimiento y la producción de la biomasa, en donde el principal parámetro es la productividad del agua (WP*). Bajo diversas condiciones climáticas, entre los modelos que relacionan el crecimiento y desarrollo del cultivo con el volumen de agua aplicada, así como con la nutrición, erosión, y salinidad se destacan los siguientes: EPIC, ALMANAC, APSIM, CROPGRO, DSSAT, ORYZA 2000, CropSyst, Aquacrop, etc. Muchos de los modelos requieren un alto nivel de detalle en cuanto a los parámetros de entrada, por ello se han desarrollado estrategias para simplificar la descripción de algunos procesos fenológicos y fisiológicos, con la finalidad de facilitar la calibración y validación en cualquier lugar del mundo.

2.3.1. Modelo agrometeorológico Aquacrop.

El modelo Aquacrop fue desarrollado por la División de Tierra y Agua de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), enfocándose en la simulación del rendimiento potencial de acuerdo al agua transpirada por el cultivo según el volumen de agua disponible en el suelo. Este modelo tiene un valor importante a nivel agrícola debido a que el agua es un recurso limitante en cultivos como: cereales, forrajes, hortalizas, frutas y tubérculos.

Adicionalmente, se utiliza para proyección de épocas de siembra óptimas, de acuerdo a condiciones del clima, suelo y el cultivo acompañado del manejo agronómico. El motor del modelo es el agua en donde la transpiración es trasladada dentro de la biomasa siendo medido por el parámetro denominado “productividad del agua” que es la relación entre la biomasa producida por un milímetro de agua transpirada en un metro cuadrado (Raes *et al.* 2009).

Los efectos causados por el estrés hídrico, el cual está definido como el aumento del potencial matricial del agua en la zona radicular causado por la disminución de humedad del suelo, se expresan a través de los siguientes parámetros los cuales evidencian los cultivos ante las condiciones de sequía: disminución del follaje, reducción de la conductancia estomatosa, además del adelanto de la senescencia de la planta afectando desfavorablemente el índice de cosecha (Raes *et al.* 2009).

Aquacrop utiliza la ecuación original de Doorenbos y Kassam (1979) para el cálculo de la biomasa, la cual tiene como base la proporción entre el agua transpirada y el rendimiento como indicador de biomasa acumulada. Como se expresa en la ecuación 3

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \quad (3)$$

Dónde: Y_x y Y_a son el rendimiento máximo y real, ET_x y ET_a son la evapotranspiración máxima real, y K_y es el factor de proporcionalidad entre la pérdida relativa de rendimiento y reducción relativa en la evapotranspiración.

Durante el proceso de la simulación, Aquacrop diferencia la evaporación del suelo (E) y la transpiración del cultivo (Tr) a partir de los datos de evapotranspiración (ETc), por medio de un modelo de crecimiento y senescencia de la cobertura del dosel. Por otro lado, el rendimiento final (Y) se obtiene mediante la relación de la biomasa (B) y el índice de cosecha (HI). Al final, separa los efectos del estrés hídrico en cuatro componentes: crecimiento cobertura vegetal, senescencia de cubierta vegetal, transpiración de cultivo y índice de cosecha (Raes *et al.* 2009).

La separación de ETc en Tr y E, evita la confusión del uso improductivo del agua, que es importante durante etapas iniciales del cultivo (suelo semidesnudo), obteniendo la ecuación conceptual en el núcleo del motor de crecimiento Aquacrop, expresado por la ecuación 4.

$$B = WP^* * \sum Tr \quad (4)$$

Dónde: B es la biomasa acumulada producida (kg m^{-2}), Tr es la transpiración del cultivo (mm o m^3 por unidad de superficie), con la suma respecto al tiempo en el que se produce la biomasa; y WP^* es el parámetro de productividad de agua (g de biomasa por m^2 y por mm, o por kg de biomasa por m^3 de agua transpirada).

Los cultivos, para garantizar el rendimiento (Y) solo utilizan una parte de la biomasa producida (B). Esta relación entre rendimiento y biomasa se le conoce como índice de cosecha (HI), expresado por la ecuación 5.

$$Y = HI * B \quad ((5))$$

La relación cultivo- agua-rendimiento ha permitido un avance a través de las ecuaciones (3), (4) y (5). Donde se tiene implicaciones fundamentales para la validez del modelo.

La Figura 3 muestra el esquema del Aquacrop indicando la cantidad de agua almacenada en la zona de la raíz simulada por el balance de agua. El agotamiento en la zona radicular determina la magnitud de un conjunto de coeficientes de estrés hídrico (K_s) que afecta a: (a) la expansión de la cobertura del dosel (CC), (b) la conductancia estomática y transpiración (Tr) por unidad de la CC , (c) la senescencia de la planta y descenso, (d) el índice de cosecha (HI) y (e) el índice de profundidad del sistema radicular (Raes *et al.* 2009).

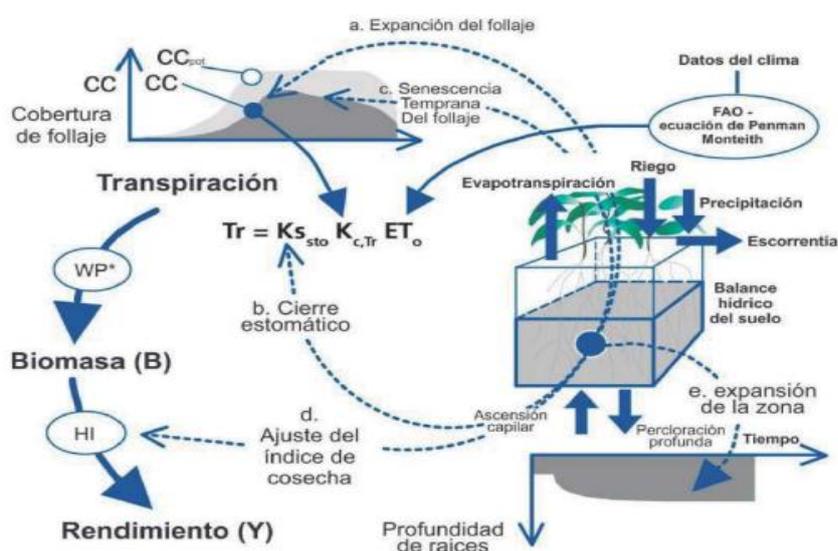


Figura 3: Esquema de funcionamiento del modelo Aquacrop

Fuente: Raes *et al.* (2009)

a. Estructura del modelo Aquacrop

La Figura 4 indica el interfaz principal del Aquacrop, donde se pueden observar los cuatro módulos para la simulación: clima, cultivo, características agronómicas y suelo. Para cada uno de ellos deben especificarse ciertos parámetros de ingreso (Ordoñez 2016).

Algunos parámetros de ingreso al modelo se describen a continuación:

- Fecha de siembra (Cultivo): Este parámetro permite especificar el día en el cual se realiza la siembra o trasplante.

- Cobertura de dosel inicial, CCo (Cultivo): Parámetro necesario para describir la expansión del dosel en los primeros días después del trasplante, y se obtiene como el producto de la densidad de siembra y del tamaño del dosel al momento del trasplante.
- Cobertura del dosel máximo, CCx (Cultivo): Este parámetro describe el porcentaje de máxima cobertura de dosel bajo condiciones óptimas.
- Días a máximo dosel, Max CC (Cultivo): Número de días que requiere el cultivo para alcanzar la máxima cobertura del dosel.
- Índice de Cosecha (Cultivo): Indica la relación entre la biomasa y el rendimiento (HI).
- Riegos (Práctica agronómica): Aquacrop presenta un sub módulo que permite describir las características del sistema de riego utilizado (superficie, aspersión y goteo).
- Fertilidad (Práctica agronómica): El porcentaje de fertilidad está determinado por la relación entre los rendimientos observados y los rendimientos óptimos (Raes *et al.* 2009)

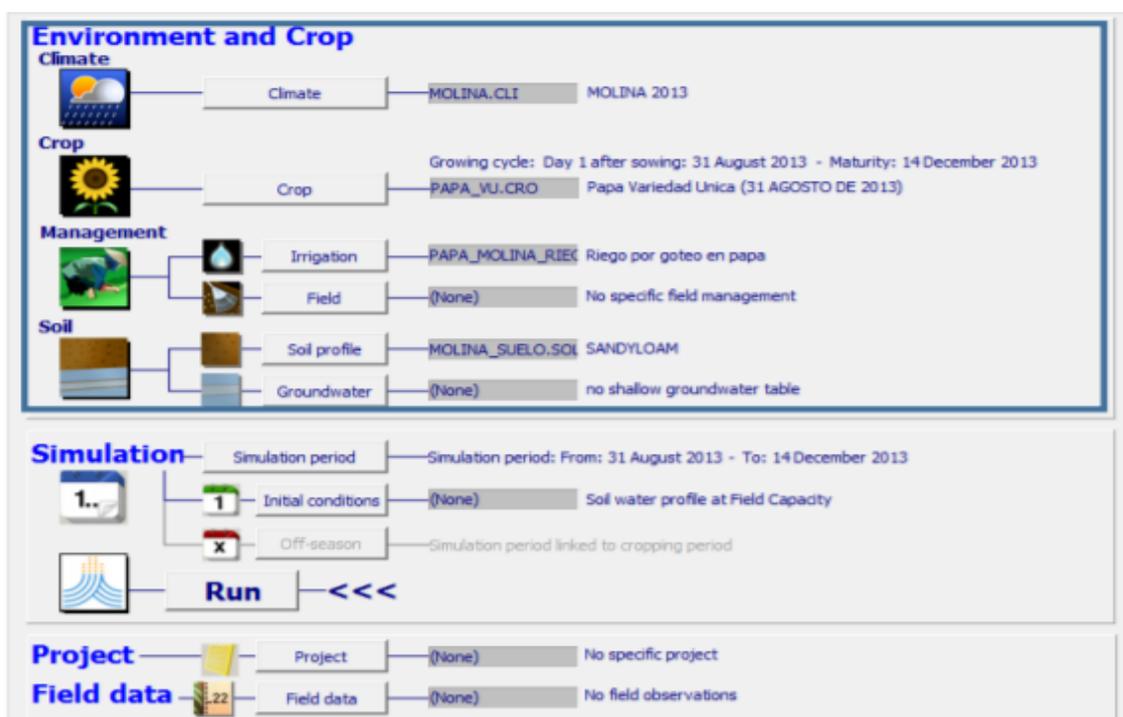


Figura 4: Interfaz principal del modelo Aquacrop

Fuente: Raes *et al.* (2009)

A continuación, se describen los módulos de ingreso al modelo:

Clima: Las principales variables meteorológicas diarias a tener en cuenta son: temperaturas mínimas y máximas del aire, precipitación y evapotranspiración de referencia. De igual forma se considera la concentración media de dióxido de carbono la cual afecta productividad del agua del cultivo, la expansión de cobertura de dosel, y la conductancia estomática (Raes *et al.* 2009).

El desarrollo del cultivo: En la simulación del desarrollo de los cultivos, la expansión del área foliar es independiente de la expansión de la zona radicular. La interdependencia entre la parte aérea y radicular es indirecta a la escasez de agua. Aquacrop utiliza la cobertura para describir el desarrollo del cultivo, siendo el dosel una característica crucial del modelo. A través de su expansión, conductancia y senescencia del cultivo, se determina la cantidad de agua transpirada (T_r) cuantificando la cantidad de biomasa producida (B) y el rendimiento final (Y). Es decir, si se presenta estrés hídrico, el CC simulada presentara un menor valor que el de la cobertura potencial (CC_{pot}), no alcanzando una profundidad radicular máxima (Raes *et al.* 2009).

Transpiración del cultivo (T_r): Se obtiene mediante el producto de la evaporación de referencia (E_{To}) y el coeficiente del cultivo (K_c). Este dato al ser proporcional a CC, debe ser ajustado constantemente. Por otro lado, la energía de evaporación se expresa como evapotranspiración del cultivo de referencia (E_{To}) determinada según la ecuación de la FAO Penman-Monteith. Por ejemplo, si el estrés hídrico induce el cierre de estomas, el coeficiente de estrés hídrico (K_s) reduce la transpiración. En conclusión, la cobertura del dosel y la conductancia estomática representan la fuente de la intensidad de la transpiración (Raes *et al.* 2009).

Biomasa aérea (B): La biomasa producida está directamente influenciada por la cantidad de agua transpirada (T_r), determinada mediante la productividad de agua. En Aquacrop la productividad del agua normalizada para el clima, expresa la relación entre la asimilación de CO_2 y la transpiración de forma independiente a las condiciones climáticas. Además, de la separación de la biomasa del rendimiento, no hay diferenciación de la biomasa por estructuras aéreas de la planta, evitando así estudiar la complejidad de los procesos de partición. (Raes *et al.* 2009).

Partición de la biomasa en el rendimiento (Y): A partir de la biomasa (B) simulada se obtiene el rendimiento del cultivo mediante el índice de Cosecha (HI), el cual siendo respuesta la al estrés hídrico o al estrés térmico, se ajustara continuamente durante el período de formación de grano (Raes *et al.* 2009).

Simulación del desarrollo agronómico del cultivo: Los procesos que hacen parte del balance hídrico en el suelo están relacionados con el desarrollo del ciclo del cultivo y sus etapas fenológicas, y en particular con la producción de biomasa, así como con el desarrollo de dosel, desarrollo radicular y la obtención del rendimiento (Raes *et al.* 2009; Ordoñez 2016).

Desarrollo del dosel: El crecimiento del dosel está dado por la expansión, el desarrollo máximo y la senescencia, estableciendo la cantidad de biomasa producida y la conductancia estomática determinando la cantidad de agua transpirada (Raes *et al.* 2009).

El desarrollo del dosel depende del área fotosintética efectiva siguiendo una curva de crecimiento que tiene una tasa constante Raes *et al.* (2009); conduciendo al uso de la ecuación de crecimiento exponencial para simular el desarrollo del dosel en la primera mitad de la curva de crecimiento bajo condiciones óptimas. Esto se expresa mediante la ecuación 6:

$$CD = CD_0 e^{CDD \times t} \quad (6)$$

Dónde: CD: es la cobertura del dosel en el tiempo t (%), CD_0 : es el tamaño inicial del dosel (a 90% de emergencia, en $t = 0$), (%); CCD: es el coeficiente de crecimiento del dosel (%. día⁻¹, o fracción. día⁻¹).

Además, es importante mencionar que la CD_0 es proporcional a la densidad de siembra y depende del valor inicial del dosel de plántula. Se obtiene mediante el producto de la densidad de siembra y el tamaño medio del dosel de las plántulas, con un 90 por ciento de germinación. Raes *et al.* (2009) mencionan que el valor de la cobertura de una plántula individual (C_s) ya ha sido evaluado para un conjunto de cultivos siendo una variable conservativa.

Por otro lado, para la segunda mitad de la curva de CD donde las plantas comienzan a traslaparse una a otras, el crecimiento del dosel ya no es proporcional al tamaño actual del dosel. por ese motivo, Aquacrop propone un decaimiento exponencial de la forma expresada por la ecuación 7.

$$CD = CD_x - 0.25 \frac{(CD_x)^2}{CDD_0} e^{-tCCD} \quad (7).$$

Dónde: CD_x: es la máxima cobertura de dosel para condiciones óptimas (% o fracción).

Además, en la fase de desarrollo la hoja es muy sensible al estrés hídrico, donde la cobertura del dosel puede ser fácilmente simulado. Por el contrario, cuando no hay presencia de estrés en la planta, es decir el umbral superior del coeficiente de estrés hídrico para expansión del crecimiento (K_{sexp}) alcanza un valor de densidad baja (Raes *et al.* 2009), Aquacrop calcula este efecto mediante la ecuación 8.

$$CCD_{ajust} = K_{S_{exp}} CCD \quad (8)$$

Dónde: CCD_{ajust}: es el coeficiente de crecimiento del dosel ajustado por estrés hídrico, K_{sexp}: es el coeficiente de estrés hídrico para expansión de crecimiento del dosel, varía de 1 a 0.

Igualmente, cuando el cultivo llega a la etapa de madurez fisiológica, la CD inicia una fase de senescencia foliar. Esta etapa es descrita por Aquacrop mediante la ecuación 9.

$$CD = CD_x [1 - 0.05 \left(\exp^{\frac{CDD}{CD_x}} - 1 \right)] \quad (9)$$

Dónde: CDD: es el coeficiente de declinación del dosel, (%. día-1, fracción. día-1, o %. día-1°C- 1), t: es el tiempo desde el inicio de la senescencia del dosel, (días).

En la Figura 5 se muestra un ejemplo de la simulación de la cobertura del dosel empleando tres coeficientes y las tres ecuaciones anteriores.

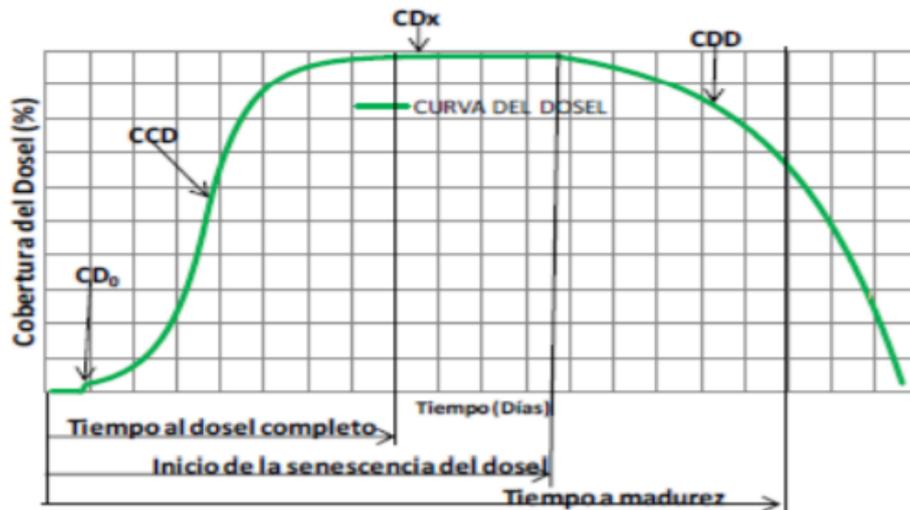


Figura 5: Variación temporal de la cobertura del dosel de un cultivo.

Fuente: Raes *et al.* (2009)

Expansión radicular: La profundidad radicular es una variable clave para estimar el balance hídrico en el cultivo. Es por eso que Aquacrop simula la profundidad radicular efectiva (PER) y el patrón de extracción de agua (Raes *et al.* 2009).

La expansión radicular se define como la profundidad hasta donde la raíz puede absorber el agua en solución. Según Soil Conservation Service (1991), el patrón de extracción de agua por las plantas es implementado por defecto en Aquacrop. Este divide la profundidad efectiva en porcentajes de 40, 30, 20 y 10 por ciento, los cuales son asignados desde el cuarto superior hacia abajo. No obstante, dichos porcentajes pueden ser cambiados por el operador (Raes *et al.* 2009). El esquema mediante el cual la profundidad efectiva de la raíz es descrita según la Ecuación 10.

$$z = Z_0 + (Z_x - Z_0) \sqrt[3]{\frac{t - \frac{t_0}{2}}{t_x - \frac{t_0}{2}}} \quad (10)$$

Dónde: Z : es la profundidad efectiva de raíces en el tiempo t (m), Z_0 es la profundidad inicial, (m), Z_x : es la máxima profundidad efectiva de raíces, (m); t_0 : es el tiempo para alcanzar la emergencia del cultivo, [día o día. °C]; t_x : es el tiempo después de plantación cuando Z_x es alcanzado, (día o día. °C), t : es el tiempo después de plantación (día o día. °C), n : es el factor de forma.

Balance hídrico: El agua almacenada en la zona radicular es simulada mediante el balance hídrico. El déficit en la zona radicular establece la magnitud del coeficiente de estrés hídrico (K_s) que afecta a: (i) la expansión de la cobertura de dosel (CC), (ii) la conductancia estomática y transpiración (Tr) por unidad de CC, (iii) la senescencia de la planta y descenso, (iv) el índice de cosecha (HI) y (v) el índice de profundidad del sistema radicular (Raes *et al.* 2009).

Manejo del riego: Para evaluar y analizar la producción del cultivo bajo diferentes regímenes de riego, se destacan los siguientes sistemas de riego (superficie, aspersión y goteo), de los que se resalta la cantidad y calidad de agua utilizada en cada uno de ellos (Raes *et al.* 2009).

2.3.2. Dinámicas de la respuesta del cultivo al estrés hídrico en Aquacrop

Las causas del estrés hídrico sobre la evapotranspiración del cultivo se estipulan con la reducción del coeficiente del cultivo (K_c). Dicha reducción se obtiene por medio del producto del coeficiente del cultivo y el coeficiente de estrés hídrico (K_s) (Raes *et al.* 2009). Dicha relación se expresa mediante la ecuación 11

$$ET_{caj} = (K_s K_{cb} +) ET_o \quad (11)$$

Dónde: ET_{caj} , es la evapotranspiración del cultivo ajustada, K_s es el coeficiente de estrés, ET_o es la evapotranspiración de referencia; K_{cb} , es el coeficiente basal del cultivo y K_e es el coeficiente de evaporación.

Igualmente, Aquacrop diferencia los efectos causados por el déficit y el exceso de agua, llamado también estrés hídrico, interfiriendo en los siguientes parámetros: (i) crecimiento del dosel, (ii) conductancia estomática, (iii) senescencia del dosel e (iv) índice de cosecha (Raes *et al.* 2009)

Siendo el desarrollo del dosel el parámetro más sensible, seguido por la conductancia estomática y finalmente la senescencia del dosel. El ajuste de los umbrales anteriores para el estrés hídrico de un cultivo se pueden observar en la Figura 6, donde se indica la diferencia del coeficiente de estrés hídrico (K_s) para cada parámetro (Raes 2017)

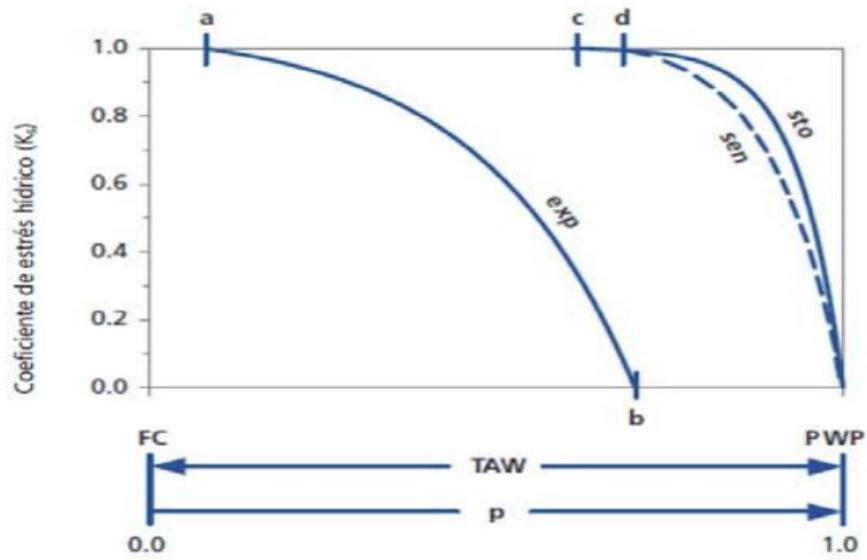


Figura 6: Curva del coeficiente de estrés hídrico (K_s) según la expansión del dosel (exp), conductancia estomática (sto), y senescencia del dosel (sen).

Fuente: Raes *et al.* (2009)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La fase experimental se desarrolló en el Área Experimental de Riego (AER) de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), ubicada en el distrito de La Molina, provincia de Lima, departamento de Lima. Esta zona se caracteriza por ser una zona desértica situada bajo las coordenadas latitud sur $-12^{\circ}4'41.77''S$, longitud oeste $-76^{\circ}56'45.20'' O$ y altitud 233 m.s.n.m. (ver Figura 7). El estudio fue realizado durante la época de transición de primavera y verano (octubre-abril) de los años 2017 y 2018 respectivamente.

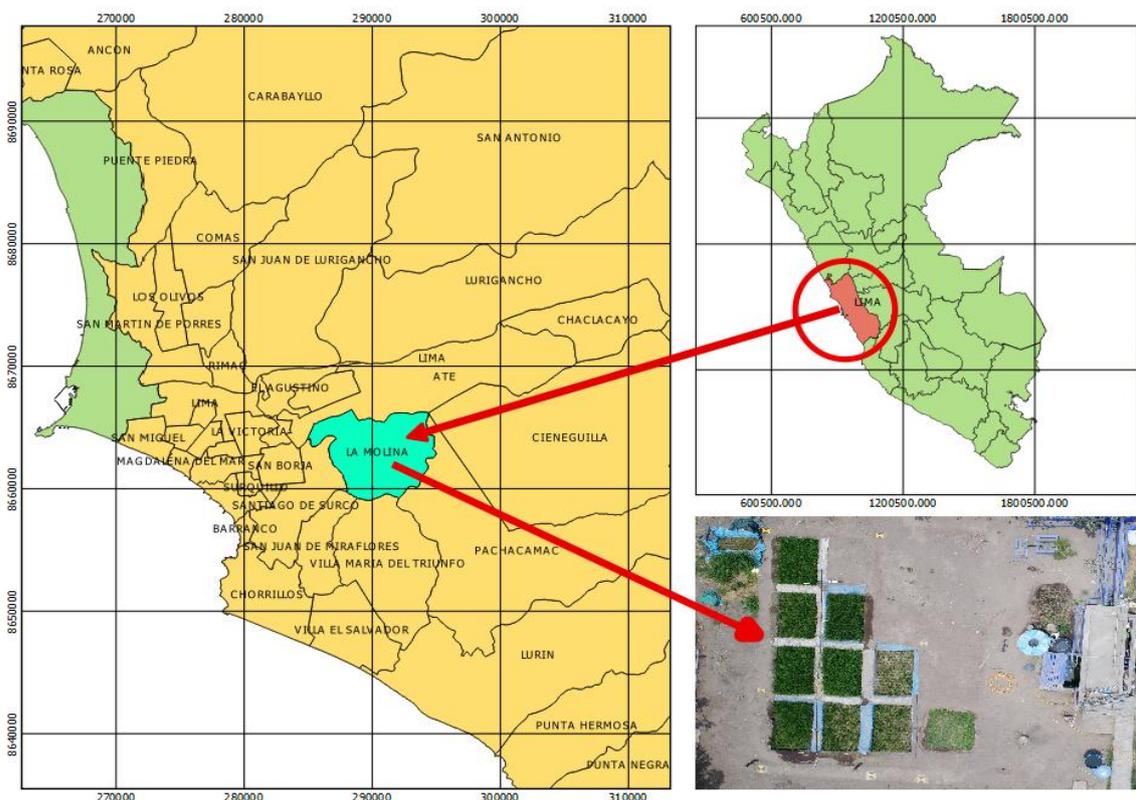


Figura 7: Ubicación de la investigación

3.1.1. Caracterización climática

Las condiciones climáticas bajo cuales se llevó a cabo la fase experimental (período primavera-verano) fueron tomadas de la estación automática Davis Vantage Pro2 ubicada al centro del Área Experimental de Riego (AER). la red proporciona lecturas medias de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, precipitación, etc., cada media hora. Los parámetros climáticos durante la etapa de desarrollo del cultivo arroz presentaron una temperatura máxima promedio de 30.1 ± 2.18 °C, temperatura mínima de 15.8 ± 1.83 °C. La velocidad del viento se mantuvo en un rango $0.26-0.95$ (m.s⁻¹). La precipitación máxima fue de 1.8 mm con un valor de humedad relativa promedio 78.7 ± 4.34 por ciento (Figura 8).

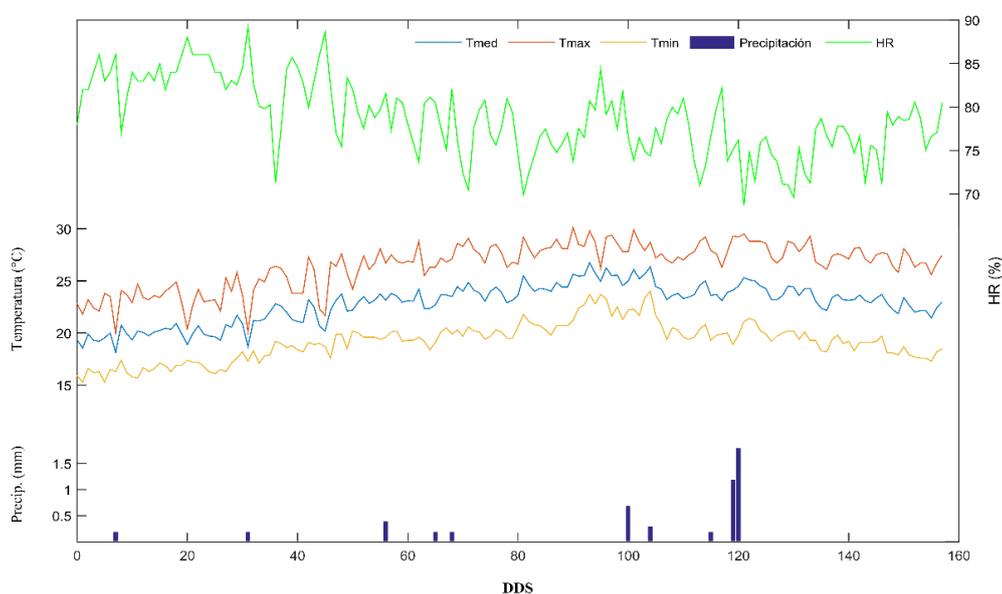


Figura 8: Variabilidad temporal de la humedad relativa, temperatura máxima, temperatura minina, temperatura media y precipitación del 15 de noviembre del 2017 al 21 de abril del 2018 en el Área Experimental de Riego de la UNALM.

3.1.2. Caracterización edáfica

El suelo fue clasificado según el sistema Soil Taxonomy USDA-NCRS, (2014) como un Ustic Torrifuvents Gutiérrez (2018). Este tipo de suelos presentan características como mayor humedad haciéndose más relevantes durante el verano. Son suelos extensos, presentes a lo largo de los ríos y en las partes más secas de las grandes llanuras. Muchos de estos suelos son irrigados y utilizados como tierras agrícolas, y en el verano se utilizan para explotación pecuaria (pastoreo).

Análisis físico-químico del suelo

El análisis físico-químicos fue realizado por el Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertirriego de la Universidad Nacional Agraria la Molina. Las muestras realizadas fueron extraídas de todas las pozas a una profundidad de 0.3 m. En el Cuadro 2 se presentan los resultados.

Cuadro 2: Análisis físico-químico del suelo

Determinación	Medida	Valor	Método de análisis
CE	dS m ⁻¹	0.93	Extracto de saturación 1-1
pH		7.62	Potenciómetro
MO	%	2.30	Walkley y Black
Fósforo asimilable	Ppm	48.69	Olsen modificado
Carbonatos totales	%	0.99	Gasos-volumetrico
Potasio asimilable	Cmol kg ⁻¹	0.50	Espectrofotometría de Absorción Atómica
Sodio asimilable	Cmol kg ⁻¹	0.13	Espectrofotometría de Absorción Atómica
Calcio asimilable	Cmol kg ⁻¹	8.36	Espectrofotometría de Absorción Atómica
Magnesio asimilable	Cmol kg ⁻¹	1.39	Espectrofotometría de Absorción Atómica
Relación Mg/K		2.78	
Relación Ca/Mg		6.00	
CIC	Cmol kg ⁻¹	10.36	
Textura		FA	Hidrómetro de Bouyucos

Fuente: con información del Laboratorio de Agua, Suelo, Medio ambiente y Fertirriego

Según Sanchez (2012), el suelo presenta textura franco arenosa, con valores de 58.56, 23.00, 18.44 por ciento de arena, limo, y arcilla respectivamente, presentando predominancia de partículas gruesas y medias. pH ligeramente alcalinos con presencia de material calcáreo en baja proporción lo que podría generar inconvenientes en la asimilación de elementos como Fosforo (P), Manganeseo (Mn), Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu) y Boro (B). Además, se evidencia concentraciones medias de sodio (Na) y de Magnesio (Mg). Las concentraciones de Potasio y Calcio (K, Ca) se encuentran en niveles altos. Las relaciones catiónicas indican posible deficiencia de Magnesio (Mg), motivo por el que realizan aplicaciones de Magnesio de forma edáfica y foliar. La presencia de sales expresada mediante la medición de la conductividad eléctrica (CE) es de 0.93 dS.m⁻¹, por lo que no se tendrá problemas de salinidad, ya que el cultivo de arroz puede soportar valores de salinidad de hasta 3.00 dS.m⁻¹ sin disminución del rendimiento (Steduto *et al.* 2012).

3.1.3. Caracterización del agua de riego

El agua de riego provino del río Rímac, caracterizándose por presentar dos etapas, la primera con precedencia directa del canal, y la segunda tomada bajo una conexión directa de reservorio general UNALM, ambas finalizando en el reservorio del Área Experimental de Riego (AER). Este reservorio tiene una capacidad de 12 m³. Las dos aguas utilizadas fueron sometidas a análisis físico-químico realizado por el Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertirriego de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

En la Figura 9 se presenta los resultados químicos de las dos fuentes de agua, Área Experimental de Riego y reservorio general de la UNALM).

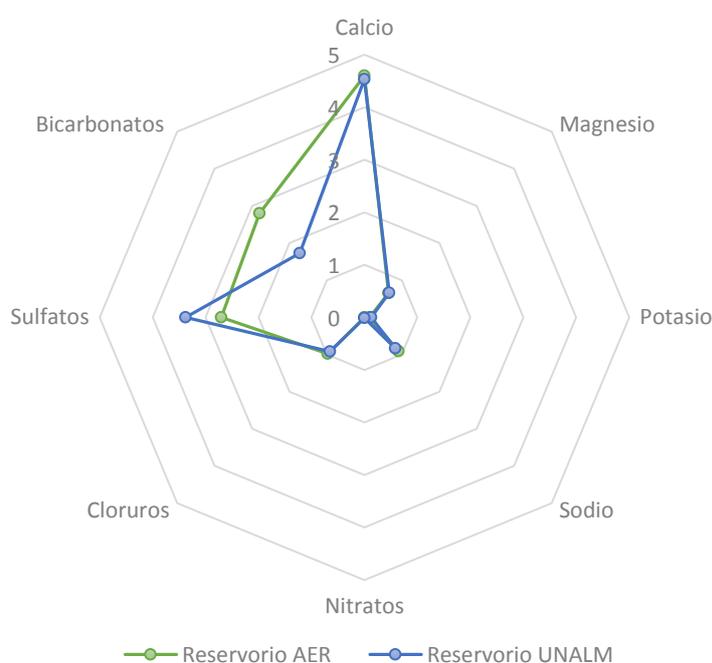


Figura 9: Diagrama radial del análisis químico del agua de riego.

Fuente: Elaborado con información del Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertirriego

Según Ayers y Westcot (1985) la clasificación del agua utilizada es C2S1 lo que indica una agua de buena calidad para uso de riego (ver Anexo 1). Ambos resultados son similares, indicando un RAS ajustado de 0.55 y 0.51 para el reservorio UNALM y AER respectivamente, resaltando la buena calidad de agua. Los niveles de bicarbonatos encontrados tanto en el agua del reservorio general de la UNALM como en el reservorio AER se encuentran dentro de valores con restricción de uso Ligero a Moderado con valores del orden de 1.73 meq. L⁻¹ y 2.80 meq. L⁻¹ respectivamente.

3.2. MATERIALES Y EQUIPOS

El genotipo de arroz utilizado fue IR-71706 procedente del International Rice Research Institute (IRRI) -Philippines, cuya característica principal es su tolerancia a estrés hídrico pudiendo producirse bajo se sistema de riego por secano y/o inundación, logrando rendimientos de hasta de 8.6 t ha⁻¹ en sistemas de siembra directa con una densidad de 80 kg ha⁻¹ de semilla (Heros *et al.* 2014). En el Cuadro 3, se presenta los materiales, equipos e insumos que fueron utilizados a lo largo del desarrollo de la investigación.

Cuadro 3: Materiales y equipos

Equipos materiales e insumos	Descripción
Reflectometría de dominio de frecuencia (FDR)	Utilizado para medición de humedad volumétrica en tiempo real; sensores GS1 y datalogger. Requieren calibración gravimétrica
Watermark	Utilizado para medición de la tensión de la humedad del suelo. Requiere calibración gravimétrica
Barrena helicoidal	Utilizado para sacar muestras de suelo, evaluación de humedad gravimétrica
Cabezal de riego	Consta de: electrobomba (q=6m ³ h ⁻¹ y 1.5 HP), Caudalímetro, filtros de anillos para retro lavado y válvulas de paso.
Tuberías de conducción.	Las tuberías de conducción fueron de PVC de 1.5''.
Estación climatológica Davis Vantage Pro2	Medición de variables climáticas diarias.
Cámara fotográfica Nikon modelo D 3300	Utilizado para capturas fotográficas, seguimiento de cobertura del dosel.
Mochila fumigadora	Aplicaciones foliares y manejo integrado de plagas y enfermedades (MIPE)
Fertilizantes, Agroquímicos	Se utilizaron para la nutrición del cultivo y el control de plagas y enfermedades.
Otros	Balanzas, herramientas (Polietileno, picos, palas, lampa, carretilla, regla, oz), bolsa de papel para muestras de suelo y recolección de plantas, etc.

3.2.1. Sistema de riego

Durante la investigación el sistema de riego estuvo operado desde el cabezal de riego, siendo impulsando por una electrobomba de 1.5 HP de potencia con un caudal de 6 m³ h⁻¹. Dicho cabezal consta de un conjunto de elementos tales como: filtros de anillos (para evitar el paso de partículas) y una red de tuberías de distribución (con un diámetro de 38 mm), las cuales están conectadas mediante accesorios como: caudalímetros, uniones y válvulas. En las Figuras 10 y 11 se representan la distribución de la red de tuberías y su respectivo cabezal de riego, utilizados en la investigación.

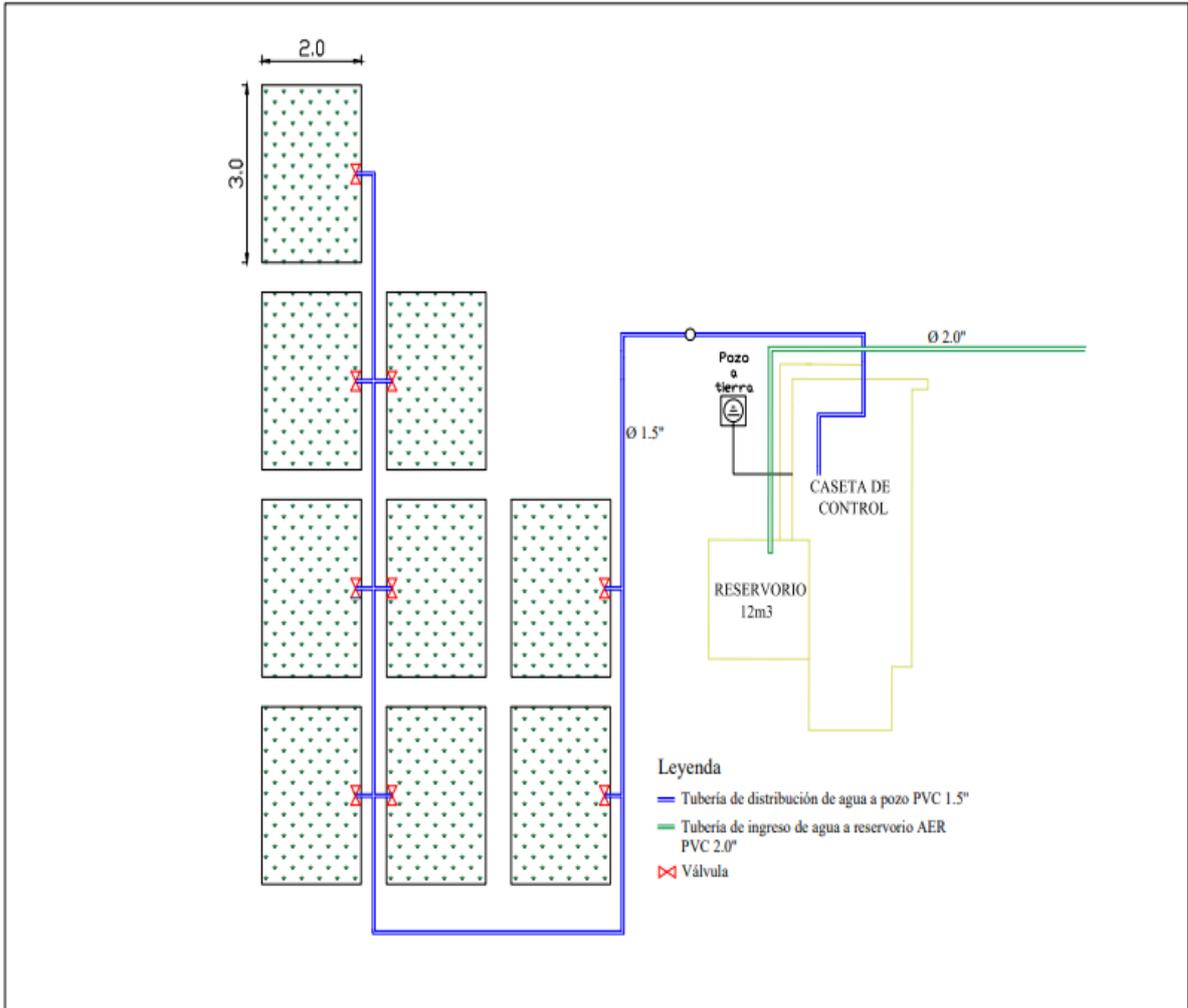


Figura 10: Sistema de riego inundado con red de distribución de agua

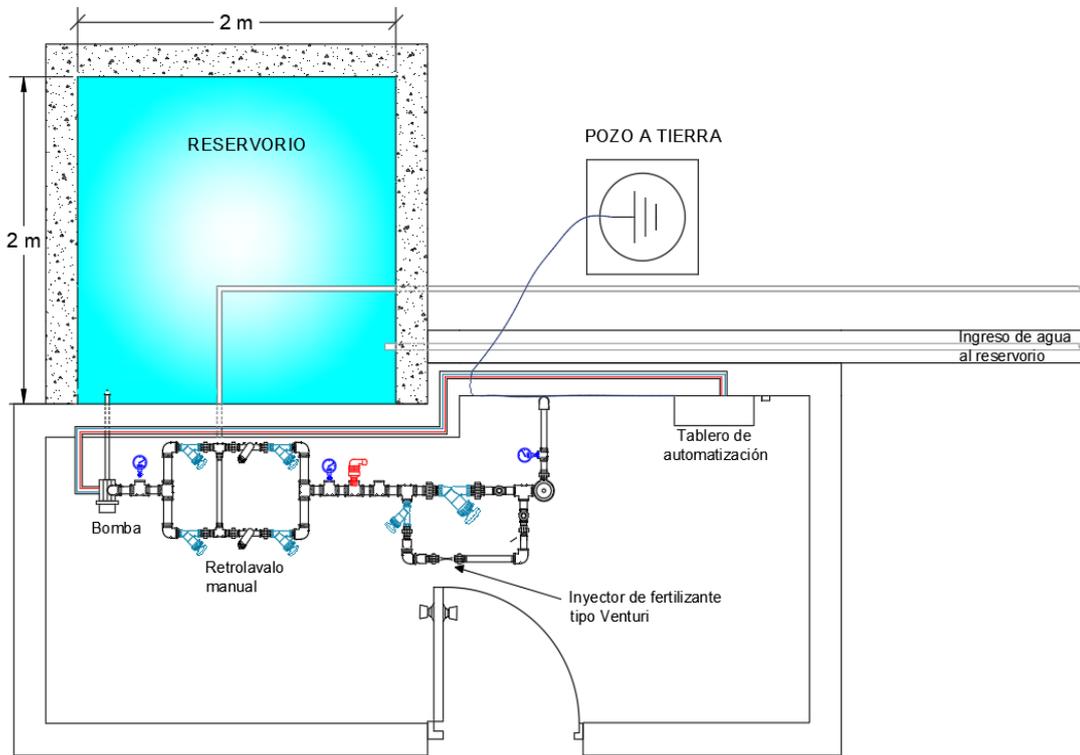


Figura 11: Vista de planta del cabezal de riego del Área Experimental de Riego (AER)

Fuente: Salazar, (2018)

a. Diseño experimental

El diseño experimental fue de bloques completamente al azar (DBCA) donde se evaluaron tres tratamientos diferenciados por la tensión del agua en el suelo, con tres repeticiones por cada tratamiento (ver Cuadro 4). El tratamiento testigo (T_0), se mantuvo saturado con una lámina de agua de 5 centímetros (inundación) esperando obtener el máximo rendimiento. Los tratamientos T_1 y T_2 fueron sometidos a períodos de humedecimiento y secado durante la etapa de macollamiento, en donde las condiciones de estrés hídrico en el cultivo de arroz no afecta significativamente el rendimiento (Chu *et al.* 2018).

Cuadro 4: Tensión de humedad del suelo según tratamientos

Tratamientos	Tensión del suelo (bares)	Variabilidad	Humedad volumétrica del suelo (%)	Variación
T ₀	0.00	±3	36.00	±3
T ₁	0.15	±3	29.00	±3
T ₂	0.30	±3	25.40	±3

La parcela experimental cuenta con nueve pozas distribuidas al azar, cada una de ellas con una superficie total de 6 m² (tres metros de largo por dos metros de ancho). Los límites laterales fueron impermeabilizadas con mantas de polietileno, hasta una profundidad de 1,5 m. evitando filtraciones laterales y efectos entre los tratamientos.

La siembra se realizó mediante la técnica de trasplante con 3 plántulas por golpe, bajo un sistema de siembra de 0.2 m x 0.2m a tres bolillo, garantizando así una densidad de población de 280,000 plantas ha⁻¹. En la Figura 12 se puede observar la distribución de las unidades experimentales con sus respectivos tratamientos

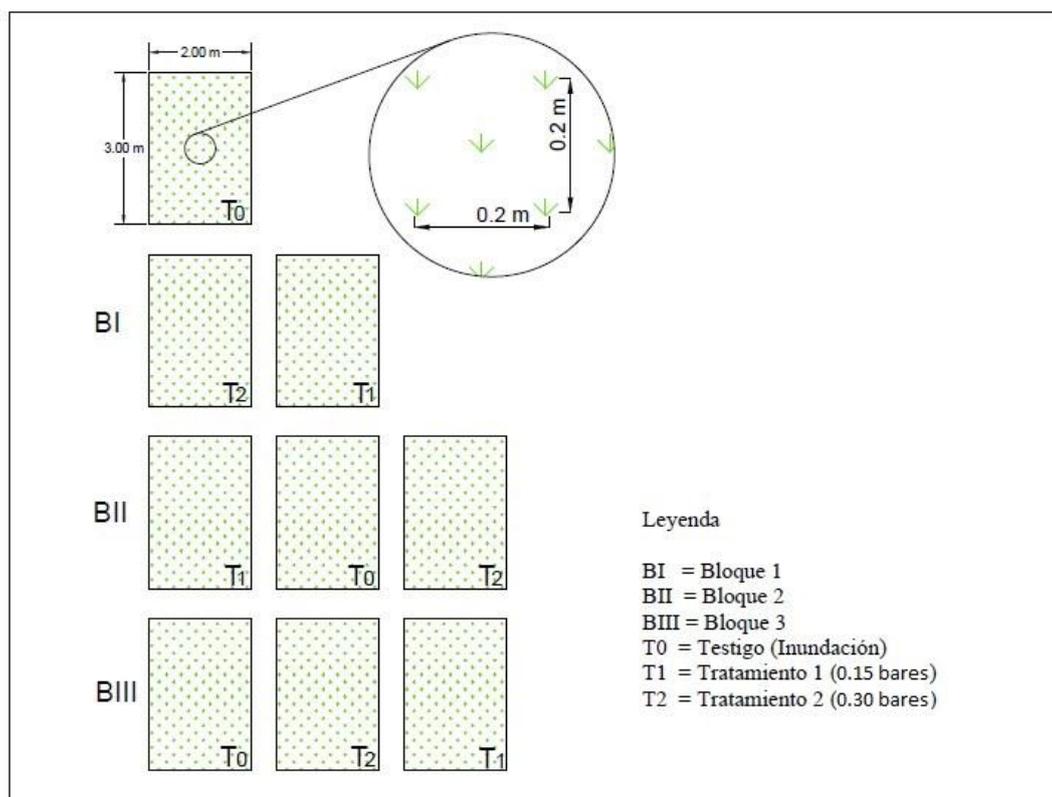


Figura 12: Diseño experimental y distribución de tratamientos

Procedimiento de la Investigación: En el Cuadro 5, se indican las actividades desarrolladas para la conducción de la investigación, (la cual fue desarrollada entre los meses de noviembre - abril). desde la preparación del terreno hasta la cosecha.

Cuadro 5: Labores culturales del cultivo

Fecha	DDS	Labor	Descripción
2/11/17	-13	Tratamiento de semilla	La semilla fue tratada con fungicida sistémico a base de Benomil (Benomil) + Azoxystrobin + Tebuconazole (Azoo duo),
8/11/17	-7	Sustrato para almacigo	Compost + suelo tamizado + arena en relación 4-2-1 respectivamente en un área de 10 metros cuadrados.
14/11/17	-1	Pre germinación	Humedecimiento de semilla en papel toalla durante un día
15/11/17	0	Siembra almacigo	Al voleo, cubriendo la semilla con suelo tamizado y así garantizar las horas oscuras para la germinación y evitando problemas de aves.
01/12/17	16	Preparación de terreno	Se impermeabilizo las paredes laterales con el fin de evitar filtración lateral que afecten los tratamientos con plástico y desagregación manual del suelo
14/12/17	28	Fango	Se realizó labores de enfangado a 30 cm de profundidad, lo cual consiste en rastrillar la superficie lodosa donde se busca reducir la permeabilidad del suelo, control de malezas y facilitar el trasplante.
15/12/17	29	Fertilización	Se realizó una fertilización 80-60-30 (N, P ₂ O ₅ , K ₂ O), más macro nutrientes (MgO, S) y elementos menores (B, Zn, Mn, Fe);
15/12/17	29	Trasplante	Las plántulas fueron llevadas a campo donde se estableció un marco de plantación de 0.2 por 0.2 metros bajo sistema de tres bolillo, con densidad de siembra de 280,000. Plantas. hectárea
15/12/17	29	Riego	Frecuencia de riego diario manteniendo una lámina de 4 cm por encima de la superficie
20/12/17	36	Instalación de sensores	Instalación de sensor FDR y Watermark
26/12/17	42	Manejo sanitario	Aplicación de Bribel + Protexin
2/01/18	49	Fertilizaciones foliares	Aplicación de sulfato de magnesio (1%) + nitrato de calcio (1%)
20/01/18	67	Manejo sanitario	Azoo doo 15ml, protexin 25, absolute 8ml, agryben 20g, sulfaplus 45g.
26/01/18	73	Inicio de secas	Inicio de secas en tratamientos T1, T2
26/01/18	73	Riego	Aplicación de agua teniendo en cuenta las tensiones establecidas a cada tratamiento 0.15 y 0.30 Bar
23/02/18	101	Aplicación foliar	Se aplicó folicur 20 ml, basfoliar 40 ml, aminoácido 40 ml, redomil 25 g, coadyuvante y corrector de pH, en 20 litros de agua
23/02/18	101	Fin de secas	Fin de estrés hídrico
23/02/18	101	Riego	Riego diario garantizando lamina sobre superficie en todos los tratamientos
24/02/18	102	Fertilización	Se realizó una fertilización 80-60-30 (N, P ₂ O ₅ , K ₂ O). Nitrato de amonio, Urea, DAP y Cloruro de Potasio
14/03/18	120	Aplicación foliar	Potasio 75 ml, aminoácido 50 ml, más adherente en 20 litros de agua
26/03/18	132	Manejo sanitario	Se aplicó redomil 25g, Azou doo 15 ml y adherente en 20 litros de agua
21/04/18	158	Cosecha	Se cosecho de forma manual, donde se realizó separando producción de cada tratamiento evaluando las plantas seleccionadas para cada variable, luego se realizó un corte de panículas con ayuda de una oz, posterior a ello se determinó la pureza del grano y pesada.
21/04/18	158	Profundidad de raíz	Determino realizando una ahoyado de 0.3*0.3*0.6 metros, con la ayuda de una cinta métrica

b. Monitoreo de la humedad volumétrica del suelo

La tensión del agua en el suelo se midió con sensores Watermark (Irrometer Corp, Riverside, CA, USA). El sensor consta de dos electrodos situados en una matriz angular, las cuales estiman la resistencia del paso de la corriente eléctrica. Estos sensores fueron instalados a 0.2 m de profundidad ubicándolos entre plantas para evitar la interferencia radicular.

La humedad suelo se determinó mediante sensores de tipo FDR GS₁ (GS₁ Decagon, con instalación de software Data Trac 3 instalado a 0.2 m de profundidad en los tratamientos de humedecimiento y secado (T1 y T2). Las sondas se conectaron al datalogger Em50G para el registro diario con intervalos de media hora a tiempo real. Este fue ubicado en la parte lateral de las pozas dentro de una cajilla de concreto. Las lecturas se calibraron a partir de los datos de humedad obtenidos por el método gravimétrico, y los datos de densidad aparente del suelo fueron obtenidos por el método de cilindro de volumen conocido. Dicha calibración se efectuó en las primeras etapas del cultivo.

c. Curva de calibración FDR y humedad volumétrica real

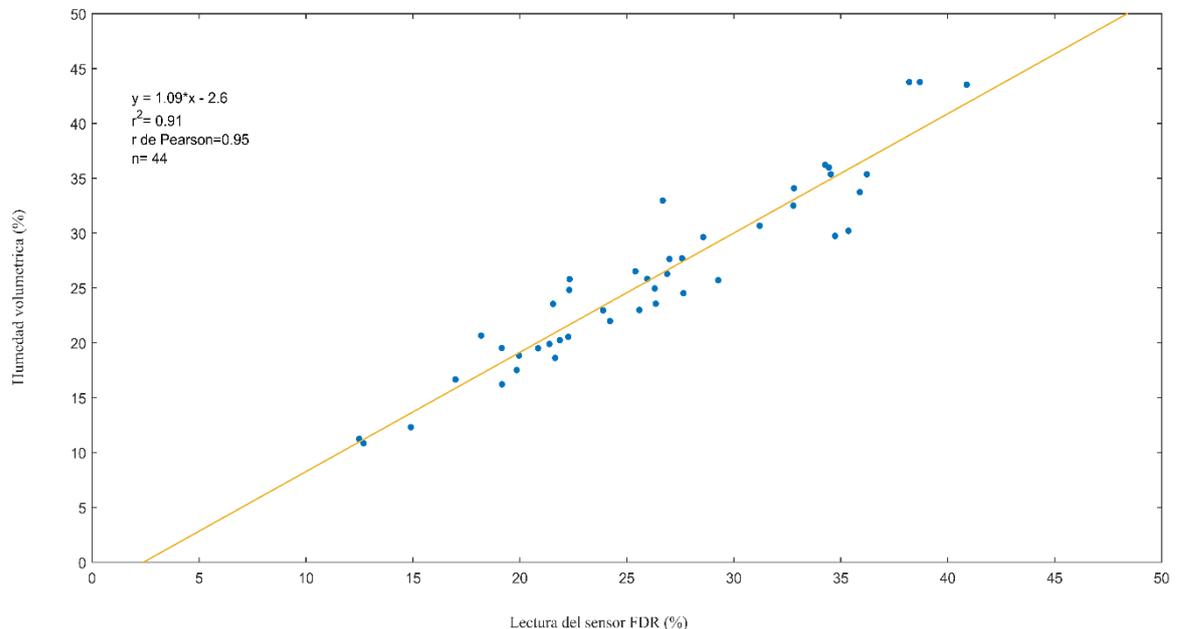


Figura 13: Curva de calibración de la humedad volumétrica (%) y la lectura del sensor FDR (%) a una profundidad de 0.2m.

La humedad volumétrica real mediante la correlación con el sensor de Reflectometría de Dominio de Frecuencia (FDR) genero una curva de ajuste basado en la ecuación lineal HV (%)= 1.09 x – 2.6 con un coeficiente de Pearson de 0.95. Ver Figura 13. Además, se indica el ajuste de la tensión del suelo con sensores Watermark (kPa) los cuales fueron llevados a bares para realizar la curva de ajuste, con respecto a los datos de humedad real mediante la ecuación $\Psi = 24.493 * e^{-0.178 x}$, con un coeficiente de Pearson de -0.83 (Salazar 2018). Ver Figura 14.

De la calibración se obtuvo un valor máximo 41.8 por ciento el cual fue utilizado como el punto de saturación del suelo para el modelo Aquacrop.

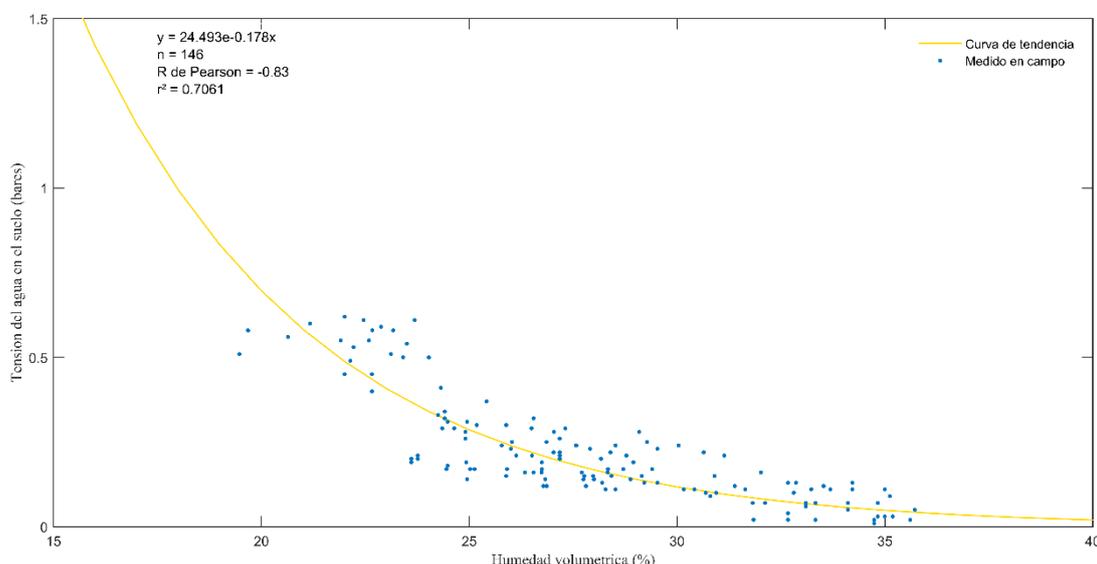


Figura 14: Curva de calibración de la humedad volumétrica (%) y la tensión de humedad del suelo (Bar).

Fuente: Salazar. (2018)

d. Alternancia de humedecimiento y secado

La técnica de humedecimiento y secado se llevó a cabo durante la etapa de macollamiento considerando las lecturas de los sensores, a una tensión del agua en el suelo conocida (0.15 y 0.30 bares) para los tratamientos T1 y T2 respectivamente, ver Figura 15. Además, se garantizó una lámina de cinco cm por encima de la superficie durante la mayor parte del ciclo de cultivo excepto en el período de secas para los tratamientos respectivos, la diferenciación de la humedad del suelo se representa en la Figura 16.

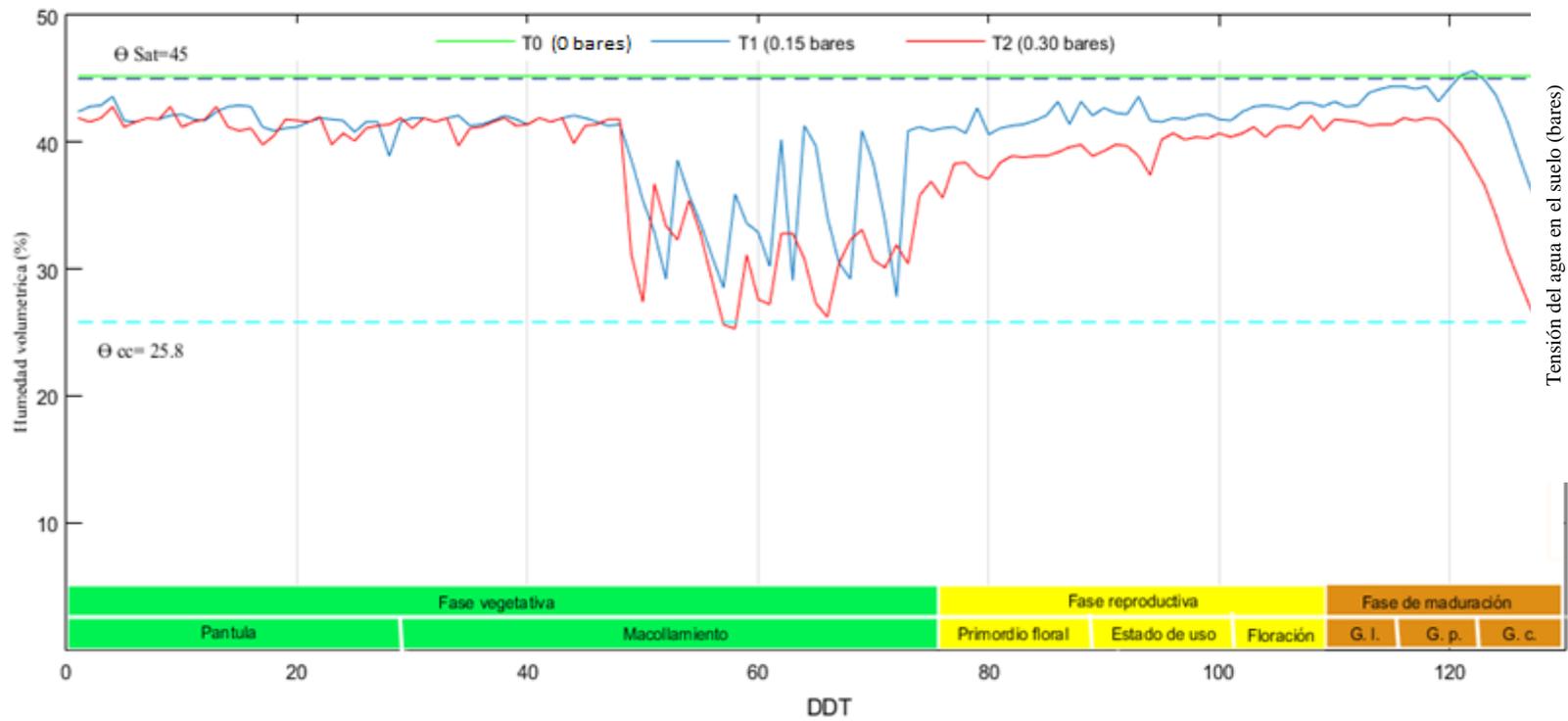


Figura 15: Variación temporal de la humedad volumétrica del suelo según diferentes regímenes de tensión del agua en el suelo.

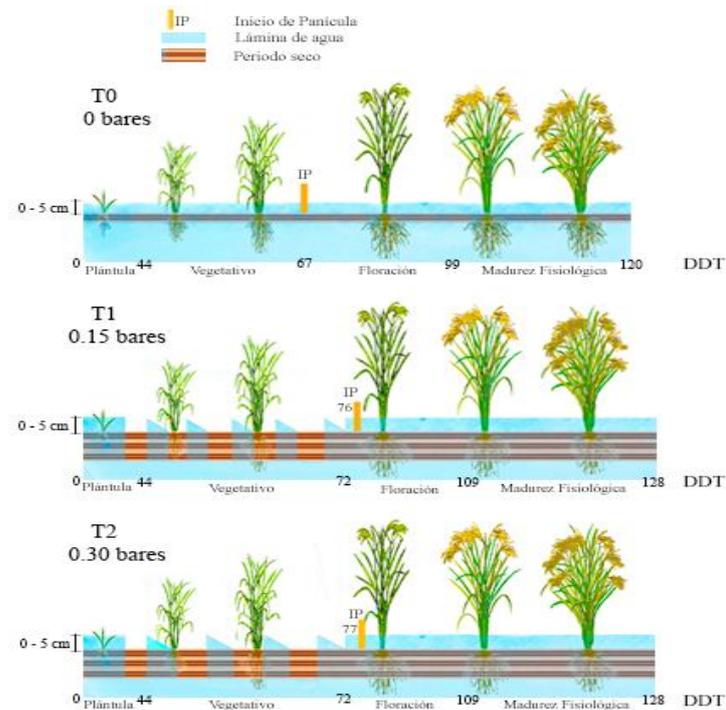


Figura 16: Tratamientos de riego con inundación continua y con alternancia de humedecimiento y secado

La evapotranspiración de referencia se calculó por el método de Penmam – Monteih y el coeficiente de cultivo (K_c) fue utilizado del estudio “Determinación del coeficiente del cultivo de arroz” realizado en la parcela experimental de riego (AER) ver Anexo 4.

3.3. PROCEDIMIENTO

3.3.1. Fase experimental

La fase experimental de la investigación se llevó a cabo en el período de transición de la primavera del año 2017 (octubre-diciembre) y verano del año 2018 (enero-abril). Se realizó la caracterización del área de trabajo de la siguiente manera:

3.3.2. Caracterización del cultivo

a. Fenología y Grados día de desarrollo (GDD)

El desarrollo de la planta de arroz desde el trasplante (plántula) hasta la madurez está determinada por períodos y características propias (Figura 1), con la diferenciación de órganos específicos en cada etapa. La duración de cada etapa depende de la variedad, del lugar de producción y las condiciones climáticas, siendo específicamente de las horas luz y

la temperatura. Para determinar el desarrollo fenológico del cultivo de arroz se tubo a consideración diferenciación fisiológica y su acumulación de grados de desarrollo (GDD) por cada etapa.

b. Evolución del grado de cobertura del dosel (CC)

La cobertura del dosel (CC) se estimó a partir de imágenes capturadas con una cámara digital réflex de objetivo único, Nikon modelo *D 3300*, de resolución de 24.2 Mpx, y sensor de imagen CMOS de tamaño 23.5x 15.6 mm. Durante el desarrollo del cultivo se realizaron 11 capturas desde el trasplante hasta el inicio de senescencia, las cuales fueron tomadas a una altura de 1.75 metros. En la base del cultivo se estableció un marco de madera de 1 m² en donde se muestreo aproximadamente 28 plantas unidad de muestra. Finalmente, las imágenes reales se procesaron con ayuda del software ERDAS IMAGINE 2014 mediante clasificación supervisada. Ver Figura 17.

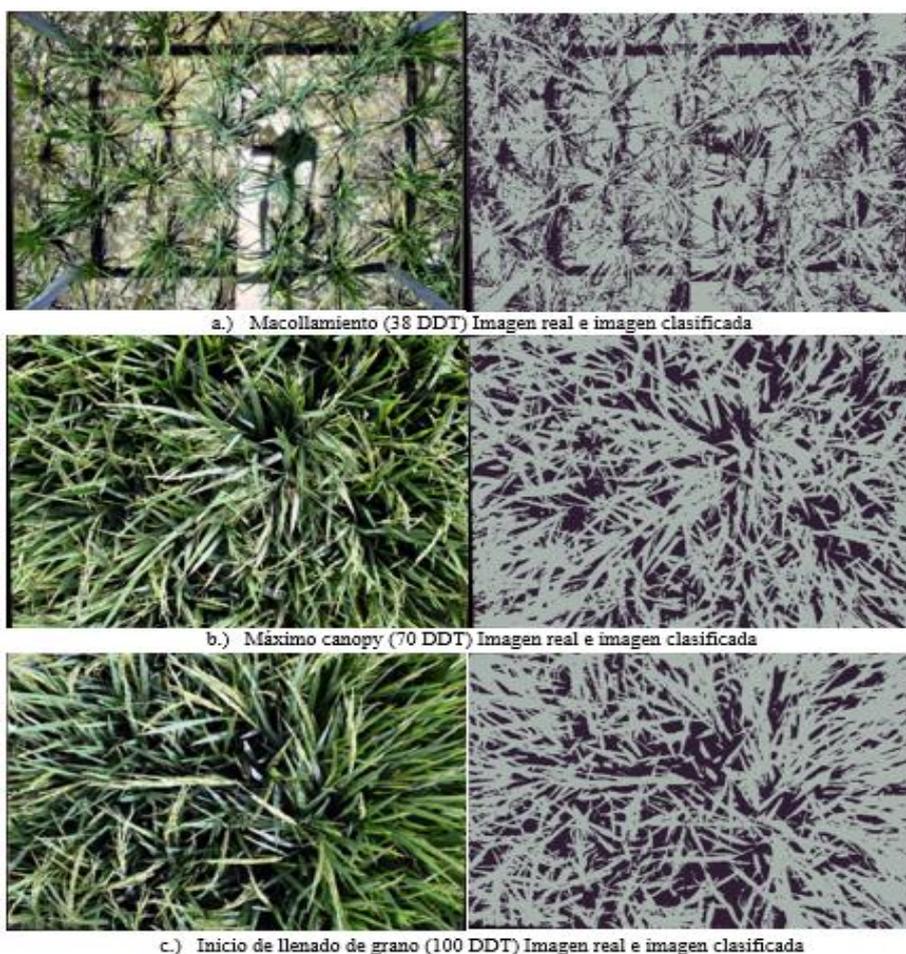


Figura 17 Imágenes de la cobertura del dosel clasificadas mediante el software ERDAS IMAGINE 2014 en: macollamiento (a), máximo dosel (b) e inicio del llenado de grano (c)

c. Rendimiento y biomasa en la cosecha

Rendimiento: Se estimó en base al peso de granos libres de impurezas. Se cosecho un área 4,5 m² por unidad experimental evitando el efecto de bordes. Se pesó y se obtuvo el rendimiento expresado en t ha⁻¹, con una humedad del 14 por ciento para grano comercial (Hidalgo *et al.* 2008). Posteriormente, se sometió a proceso de secado a estufa a una temperatura constante de 70 °C hasta obtener el peso seco constante, y así estimar la materia seca.

Biomasa: Se evaluaron siete plantas, de las cuales se separó el grano de la parte aérea de la planta (tallos, hojas y raíces), y se secó hasta obtener peso constante en t ha⁻¹. Índice de cosecha (HI): Se obtuvo relacionando el rendimiento en peso seco con el peso de materia seca total, expresado en porcentaje.

Profundidad de raíz: Se evaluaron cinco de las siete plantas seleccionadas para medir parámetros fenológicos. Se realizó una excavación con las siguientes dimensiones 0.3 m x 0.3 m x 0.6 m. para poder extraer la raíz, lavarla y medir la longitud desde la base de la planta hasta máxima profundidad radicular.

Para el análisis estadístico se utilizó la diferencia entre las medias de las poblaciones, teniendo en cuenta el análisis de la varianza (ANOVA). Después se aplicó la prueba de significancia de Tukey o prueba de medias con un nivel de confianza de 95 por ciento. El análisis estadístico se realizó con ayuda del software InfoStat 2018.

3.4.2. Identificación de parámetros del modelo y análisis de sensibilidad.

El análisis de sensibilidad se puede utilizar para identificar el efecto de los parámetros sobre el rendimiento del cultivo. Estudios anteriores han indicado que los rangos, las distribuciones y las propiedades de muchos parámetros son difíciles de estimar (Jin *et al.* 2018; Confalonieri *et al.* 2010).

El análisis de sensibilidad es una herramienta eficaz para estudiar modelos de cultivos; donde se puede determinar parámetros de alta o baja influencia respecto a la biomasa, cobertura del dosel y rendimiento de grano configurándose como valor predeterminado (Xing *et al.* 2017), (Stella *et al.* 2014).

Para el análisis de sensibilidad se realizó la caracterización de los parámetros del modelo Aquacrop (Cuadro 6), en que se diferenciaron los parámetros de alta, moderada y baja sensibilidad con unas variaciones de rendimiento y biomasa mayores a 15, entre 15-2 y menor a 2 por ciento respectivamente, según la escala propuesta por Geerts *et al.* (2009)

Cuadro 6: Parámetros para el análisis de sensibilidad en el modelo Aquacrop.

Parámetros	Descripción	Valores predet.	unidad
Cobertura del dosel y desarrollo fenológico			
<i>T_b</i> :	Temperatura base	10	°C
<i>T_{sup}</i>	Temperatura superior	30	°C
<i>CC₀</i>	Cobertura inicial del dosel	6	%
<i>t-t</i>	Tiempo de trasplante a recuperación	50	GDD
<i>CGC</i>	Coefficiente de crecimiento de cultivo	8	% día ⁻¹
<i>CC_x</i>	Máxima cobertura del dosel	98	%
<i>t-s</i>	Tiempo desde trasplante a senescencia	1300	GDD
<i>CDC</i>	Coefficiente de disminución del dosel	0.5	% GDD ⁻¹
<i>t-m</i>	Tiempo de trasplante maduración	1855	GDD
Floración			
<i>t-f</i>	Tiempo de trasplante a floración	1150	GDD
Desarrollo de raíces			
<i>R_{tx}</i>	Prof. Máxima de raíz	0.32	m
<i>R_{tn}</i>	Prof. Mínima de raíz	0.1	m
<i>sf-rtx</i>	Factor de forma de expansión de raíz	2	GDD
<i>t-rtx</i>	tiempo de trasplante a máxima profundidad de raíz	553	GDD
Transpiración de cultivo			
<i>K_{c_{tr}}</i>	Coefficiente del cultivo cuando el dosel está completo, pero antes de senescencia.	1.15	-
<i>K_{c age}</i>	Disminución del coeficiente del cultivo como resultado de envejecimiento	0.15	-
<i>K_{c evap}</i>	Efecto de la cubierta del dosel en la reducción de la evaporación del suelo en la etapa final de la temporada	50	-
Producción de biomasa y rendimiento			
<i>WP*</i>	Producción del agua del cultivo	19	Gram m ⁻²
<i>WP-h</i>	Productividad del agua del cultivo durante la formación de rendimiento	100	Gram m ⁻²
<i>H_{io}</i>	Índice de cosecha de referencia	43	%
Estrés hídrico y térmico			
<i>P_{ex-P,lower}</i>	Umbral superior de agotamiento del agua del suelo que limita la expansión de la cubierta	0.00	-
<i>P_{ex-p,Upper}</i>	Umbral inferior del agotamiento del agua del suelo que limita la expansión de la cubierta.	0.40	-
<i>Sf-exp</i>	Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para la expansión del dosel	2.00	-
<i>P_{sto}</i>	Umbral superior del agotamiento del agua del suelo que limita la conductancia estomática	0.50	-
<i>Sf-psto</i>	Factor de forma para el coeficiente del estrés hídrico para el control del estoma.	3.00	-
<i>P_{sen}</i>	Umbral de agotamiento del agua del suelo para el control estomático, límite superior	0.60	-
<i>Sf-psen</i>	Factor de forma del coeficiente de estrés hídrico en la senescencia del dosel	3.00	-

<<Continuación>>

<i>Ppol</i>	Umbral superior para el agotamiento del agua de suelo por limitación de la polinización	0.75	-
<i>Ks pol,c</i>	Umbral máximo superior para que se le dé la polinización	8.00	°C
<i>Ks pol,h</i>	Umbral mínimo inferior para que se le dé la polinización	35.00	°C
Fuente: Raes <i>et al.</i> (2018)			

3.4.3. Calibración de modelo Aquacrop

Durante la calibración del modelo se simuló el desarrollo de la cobertura del dosel usando los datos obtenidos en campo de las pozas inundadas (T_0). Se ajustaron manualmente los parámetros del modelo, para que la curva de desarrollo del dosel simulada se ajuste a los datos observados en campo. La calibración se determinó mediante indicadores estadísticos de eficiencia (Cuadro 7).

El rendimiento y la biomasa simulados también fueron calibrados con las observaciones en campo el día de la cosecha.

Cuadro 7: Criterios para la evaluar la eficiencia de la calibración del modelo

Indicador	Valor	Calificación de desempeño
Coeficiente de correlación de Pearson (R) $\left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - MO)(S_i - MS)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - MO)^2 \sum_{i=1}^n (S_i - MS)^2}} \right]$	Rango < -1, 1 >	Significativo (Prueba de Student) No significativo (Prueba de Student)
Raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE) $NRMSE = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} * 100$	NRMSE= % < 10% 10 - 20% 20 - 30% >30%	Excelente Buena Aceptable Mala
Coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (EF) $EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - MO)^2}$	Rango < -∞, 1 > 0.75 < NSE < 1.00 0.65 < NSE < 0.75 0.50 < NSE < 0.65 0.40 < NSE ≤ 0.50 NSE < 0.40	Muy bueno Buena Satisfactorio Aceptable Insatisfactorio
Índice de Willmott (d) $d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - MO + O_i - MO)^2}$	Rango < -∞ < d ≤ 1 d = 1 d = 0	Perfecto acuerdo No hay acuerdo

Fuente: Steduto *et al.* (2012); Moriasi *et al.* (2007)

Dónde: O_i datos observados, S_i datos simulados, MO media observada

a. Coeficiente de estrés hídrico (Ks)

El coeficiente de estrés hídrico se determinó por la relación de la humedad del suelo con el rendimiento. Ubicados en el eje “x” del plano cartesiano se ubica la cantidad de agua (mm) que puede retener el suelo, mientras que en el eje “y” se encuentran los valores del Ks, los cuales van desde 0 a 1. La relación entre la cantidad de agua del suelo y el rendimiento del cultivo establece un Ks experimental. El Ks calculado se obtuvo mediante las ecuaciones 12 y 13 propuestas por raes *et al.* (2009).

$$Ks = 1 - \frac{e^{(Drel*fs)} - 1}{e^{fs} - 1} \quad (12)$$

$$Drel i = 1 - \frac{p_{lower} - \frac{Dr}{TAW}}{p_{lower} - p_{upper}} \quad (13)$$

Dónde: Ks: coeficiente de estrés hídrico, puede ser por reducción de la expansión de la hoja (Ksexp), o por inducción del cierre estomático. Drel es el agotamiento relativo de la humedad del suelo, o la fracción de agua agotada relativa al total de agua disponible que el suelo puede contener. fs es el factor de forma de la curva de respuesta entre Ks y Drel. Los valores de fs son diferentes para los coeficientes Ksxp, Kssto, Kssen. Dr es el agotamiento del agua en la raíz. TAW indica el agua total disponible en el suelo entre la capacidad de campo y el punto de marchitez. p_{lower} es el agotamiento máximo de humedad del suelo y p_{upper} el mínimo.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN DE CULTIVO

4.1.1. Fenología del cultivo y grados día de desarrollo

La acumulación de los grados día de desarrollo en las diferentes etapas del cultivar IR-71706, desde el trasplante hasta la madurez fisiológica para el tratamiento testigo a cero bares (T0) se muestra en la Figura 18, diferenciándose de los tratamientos de alternancia de humedecimiento y secado. Para mayor detalle de tratamientos T1 y T2 (0.15 y 0.30 bares), ver Anexo 11.

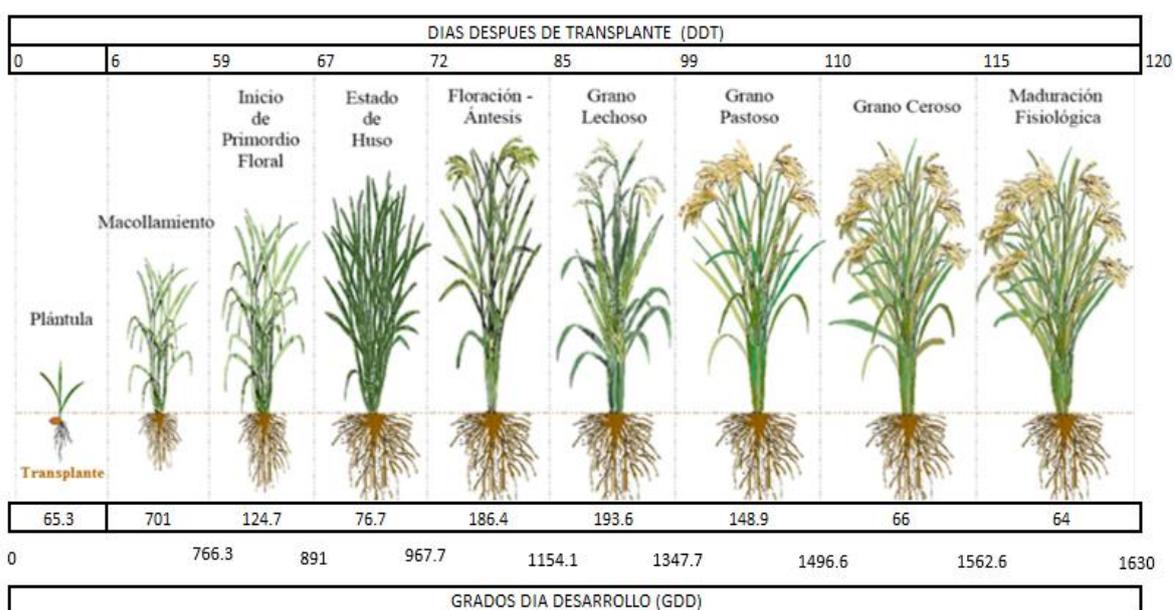


Figura 18: Fenología del cultivo de arroz según GDD acumulados y DDT. Fases fenológicas según Yzarra y López (2012) .

Se presentó un período de producción (trasplante a cosecha), de 120 días con una acumulación de 1630 grados de desarrollo. Estos resultados se ubicaron por debajo a los encontrados por Islam y Sikder (2011) en Bangladesh, bajo un sistema de producción inorgánica, donde la variedad Swarna presentó un ciclo de producción de 166 días, con

una acumulación de 1918 GDD. Cabe resaltar que ambos cultivares presentan características de genotipos precoces intermedios establecidas por Buitrago *et al.* (2014), acortando el ciclo de producción.

Además, estudios realizados en el Valle de Jequetepeque – Perú bajo riego inundado Rodríguez (2017) encontró una duración desde el trasplante hasta la cosecha de 135 días, superando en 15 días el ciclo productivo.

En el Cuadro 8 se presenta un resumen de la duración de la fenología en días y GDD para los diferentes regímenes de riego, indicando que los tratamientos T1 y T2 presentan un ciclo hasta la madurez fisiológica más prolongado con respecto al testigo (T0) en 8 días, incrementando los GDD en 87 grados a causa de la formación de nuevos macollos durante el período de secas, formando panículas tardías. Similar al comportamiento encontrado por Alou *et al.* (2018) bajo riego continuo y secas al inicio de panícula con valores de acumulación de grados día de desarrollo de 1947 y 2041 GDD respectivamente. Sin embargo, en el estudio realizado por Maniruzzaman *et al.* (2015) obtuvieron que el ciclo más corto, se presentó en el tratamiento a, cinco días después de secas, seguido por tres días después de secas, y finalmente bajo riego continuo con duraciones de 96, 98 y 100 días respectivamente.

Cuadro 8: Fenología del cultivo en diferentes regímenes de agua expresada DDT y GDD

Etapa	T0 (0 bares)		T1 (0.15 bares)		T 2(0.30 bares)	
	DDT	GDD	DIA	GDD	DIA	GDD
Plántula	6	65.3	6	65.3	6	65.3
Macollamiento	59	766.3	69	891	71	922
Inicio primordio floral	67	891	76	1014.8	77	1029.2
Estado de uso	72	967.6	80	1084	83	1125
Floración, Antesis	85	1154.1	95	1278.9	96	1321.1
Grano lechoso	99	1347.7	109	1469.7	109	1497.4
Grano pastoso	110	1496.6	119	1602.5	119	1630
Grano ceroso	115	1562.6	124	1664.6	124	1662.3
Madurez fisiológica	120	1630	128	1717	128	1717

4.1.2. Rendimiento y biomasa en la cosecha

a. Rendimiento

En la Figura 19 y en el Cuadro 9, se indican la media del rendimiento de arroz en cascara expresado en $t\ ha^{-1}$, la desviación estandar y el coeficiente de variación.

Cuadro 9: Rendimiento de arroz en cáscara

Tratamiento	Rendimiento ($t\ ha^{-1}$)	Desviación estandar ($t\ ha^{-1}$)	Coficiente de variación (%)	Mínimo	Máximo
T0	7.27 A	1.40	0.19	5.99	8.76
T1	7.33 A	1.63	0.22	5.80	9.04
T2	8.58 A	0.17	0.02	8.51	8.77

En estudios previos del genotipo IR-71706, realizados por Heros *et al.* (2014), se presentaron rendimientos de $8.63\ t\ ha^{-1}$, indicando que la variedad es tolerante a la sequía pudiendo ser cultivado bajo riego continuo (inundación) y alternancia de humedecimiento y secado. En el presente estudio la inducción del estrés hídrico por potencial hídrico del suelo a 0.15 y 0.30 bares no afectó significativamente el rendimiento $P>0.05$ ver Anexo 5. El tratamiento menos productivo fue el T0, con un rendimiento de $7.27\ t\ ha^{-1}$ de grano en cascara igualando al rendimiento nacional $7.2\ t\ ha^{-1}$ (MINAGRI 2018).

El mayor rendimiento se obtuvo en el tratamiento T2 con un promedio $8.58\ t\ ha^{-1}$ de grano en cascara superando a la media nacional en un 19 por ciento, debido a la presencia de un mayor número de panículas por planta, inferido por la diferencia estadística en el peso de 1000 granos. Similar a los resultados encontrados por Maniruzzaman *et al.* (2015) en Bangladesh con mayor rendimiento medio en el tratamiento tres días después de secas con una producción de $5.9\ t\ ha^{-1}$. Por el contrario Alou *et al.* (2018) obtuvieron que bajo riego continuo un rendimiento máximo con valores promedio de $7.16\ t\ ha^{-1}$.

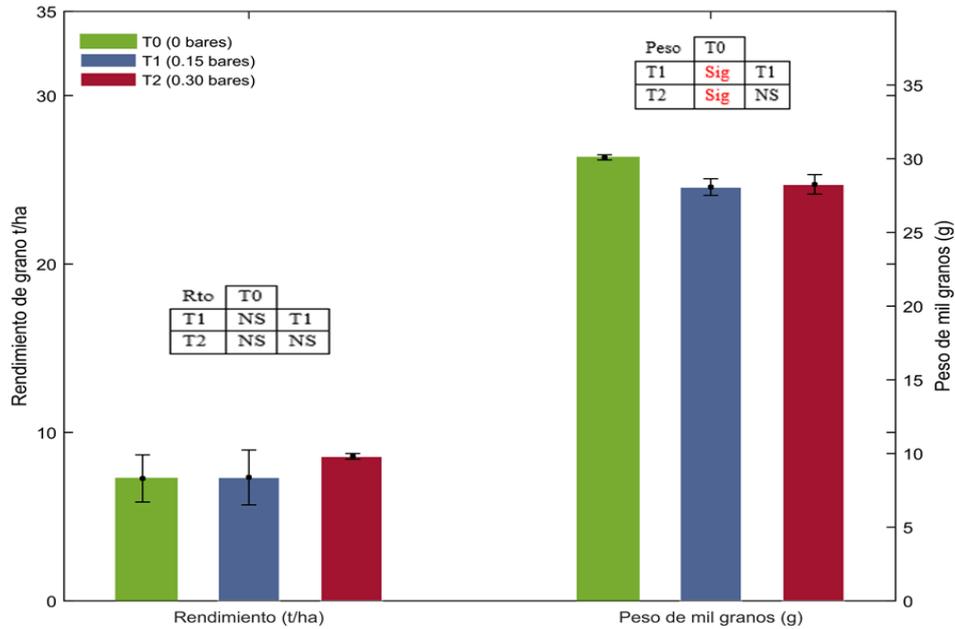


Figura 19: Barras de la media del rendimiento $t\ ha^{-1}$ y box plot de la desviación estándar (panel izquierdo) y peso de mil granos g (panel derecho), con matriz que representa el grado de significancia según prueba de Tukey

e. Rendimiento de mil granos (Índice de grano)

En el Cuadro 10 y en la Figura 19, se indica los valores promedio del peso de mil granos de arroz en cascara, donde la desviación estándar y el coeficiente de variación fluctúan entre 0.15 y 0.58 g y 0.006 y 0.026 por ciento respectivamente. Según el análisis de varianza se indica que existen diferencias significativas en la variable “índice de grano” (ver Anexo 6). El tratamiento testigo produjo el mayor índice de grano con una media de 26.33 gramos siendo cercano a lo obtenido por Rodríguez (2017) con una media de 26 gramos en la variedad Capirona. Finalmente la variable suministra caracteres que permiten determinar la calidad de grano (Zhao *et al.* 2007).

Asimismo, los tratamientos bajo estrés hídrico presentaron valores menores que el testigo, con valores promedio de 24.57 y 24.73 g para los tratamientos T1 y T2 respectivamente. en un estudio similar realizado por Alou *et al.* (2018) encuentra diferencias entre riego continuo y estrés al inicio de macollamiento con medias del orden de 23.68 y 22.47 gramos.

Cuadro 10: Peso de mil granos llenos

Tratamiento	Peso de mil granos (g)	Desviación estandar (g)	Coficiente de variación (%)	Mínimo	Máximo
T0	26.33 B	0.15	0.006	26.20	26.50
T1	24.57 A	0.50	0.020	24.00	24.90
T2	24.73 A	0.58	0.023	24.40	25.40

f. Biomasa

En el Cuadro 11 y en la Figura 20, se presentan valores de la media para la variable biomasa, con su respectiva desviación estándar y coeficiente de variación, los cuales fluctúan entre 2.42 y 4.40 t ha⁻¹ y 0.14 y 0.23 por ciento respectivamente. Según análisis de varianza no existieron diferencias significativas (P>0.059) ver Anexo 7. aun así, se expresa la acumulación de materia seca con valores de 18.63 t ha⁻¹, 17.7 t ha⁻¹ y 17.36 t ha⁻¹ para T0 (0 bares), T1 (0.15 bares) y T2 (0.30 bares) respectivamente. De forma similar a lo encontrado por Salazar (2018) no existes significativas entre los tratamientos bajo un sistema de riego por goteo. En ambos estudios el estrés hídrico se indujo en la etapa de macollamiento. Sin embargo, Alou *et al.* (2018) encontraron diferencias significativas al someter a estrés hídrico al cultivo al inicio de la fase de formación de panícula, indicado por la disminución del peso de la planta.

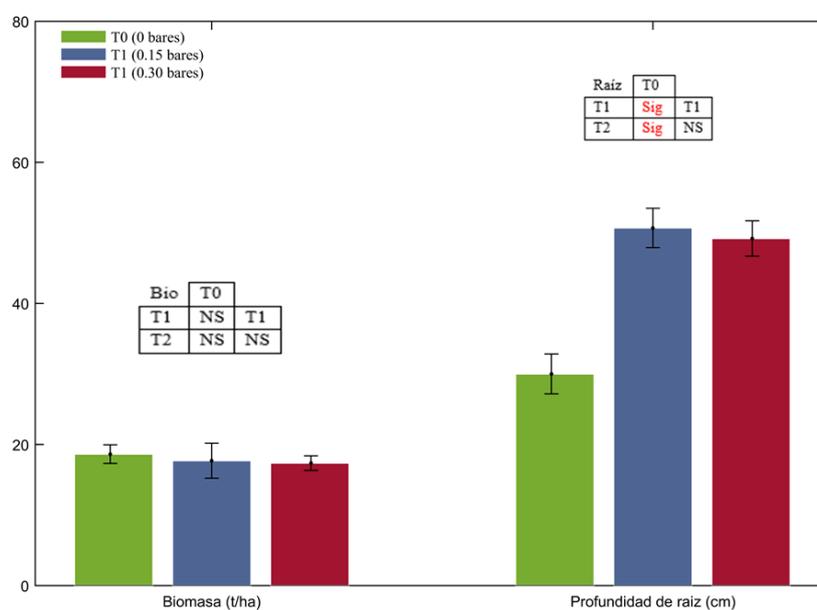


Figura 20: Barras de la media de biomasa t ha⁻¹ y box plot de desviación estándar (panel izquierdo) y profundidad de raíz m (panel derecho), con matriz que representa el grado de significancia según prueba de Tukey

Cuadro 11: Acumulación de materia seca (Biomasa)

Tratamiento	Biomasa (t ha ⁻¹)	Desviación estandar (t ha ⁻¹)	Coficiente de variación (%)	Mínimo	Máximo
T0	18.63 A	4.40	0.23	12.33	26.18
T1	17.70 A	2.57	0.14	12.64	21.56
T2	17.36 A	2.42	0.14	14.54	23.01

g. Profundidad de raíz

En el Cuadro 12 y en la Figura 20, se indica la media de la profundidad radicular, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Según la prueba estadística de Tukey (Anexo 8), indica que entre los tratamientos con tensión de humedad del suelo de 0.15 y 0.30 bares no existen diferencias significativas con un promedio de 50 cm de profundidad. Por otro lado, si se encontraron diferencias significativas respecto a tratamiento inundado con una media de 30 cm. Debido a que las raíces a condiciones de estrés hídrico pueden explorar un mayor volumen de suelo, en búsqueda de nutrientes en solución para garantizar así un incremento en la producción. El estudio realizado por Raes *et al.* (2018), bajo un sistema de riego inundado encontró que el desarrollo radicular se establece bajo rangos de 30 a 60 cm de profundidad.

Cuadro 12: Profundidad de raíz

Tratamiento	Profundidad raíz (cm)	Desviación estandar (cm)	Coficiente de variación (%)	Mínimo	Máximo
T0	30 A	2.83	0.094	26	36
T1	50 B	2.80	0.055	45	55
T2	49 B	2.51	0.051	43	53

h. Balance hídrico

En el Cuadro 13 se indica el balance hídrico del cultivo de arroz obtenido mediante el modelo Aquacrop, donde se resalta la tasa de la evaporación, la transpiración, la infiltración y la percolación, indicando que los tratamientos bajo la técnica de riego de humedecimiento y secado (T1 y T2), son los que emplean mayor lámina de agua aplicada con valores de 3534.1 y 3148 mm respectivamente, respecto al tratamiento testigo (T0) con 1830.4 mm. El valor más alto de T1 y T2 es debido a la mayor pérdida por percolación con valores de 3137.1 y 2751.3 mm respectivamente. No obstante, la alta tasa de percolación de los tratamientos bajo la técnica de riego inundado con alternancia de humedecimiento y secado se debe a el rompimiento de la capa semipermeable del suelo (fangeo) causada por la pérdida de la estructura de esta capa al momento de la alternancia de humedecimiento y secado. Respecto a la tasa de transpiración del cultivo hay un ligero incremento en T1 y T2 debido a

una mayor duración del ciclo del cultivo en 8 respecto al testigo. Mayor detalle del balance hídrico y el ajuste del modelo se aprecia en el Anexo 8.

Cuadro 13: Balance hídrico del modelo Aquacrop

Tratamiento	Evaporación (mm)	Transpiración (mm)	Infiltración (mm)	Percolación (mm)
T0 (0 bares)	68.3	317.1	1830.4	1459.4
T1 (0.15 bares)	70.6	326.3	3534.1	3137.1
T2 (0.30 bares)	78.2	318.5	3148.0	2751.3

4.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO AQUACROP

En la Figura 21 se muestran los parámetros de alta sensibilidad para el modelo, estos fueron identificados por medio de las variaciones del rendimiento y la biomasa los cuales deben ser mayores al 15 por ciento. Dichos parámetros fueron los siguientes: Productividad del agua (WP), productividad del agua durante la formación de rendimiento (WPh), coeficiente de transpiración del cultivo (Kc), coeficiente de disminución del dosel (CDC), coeficiente de crecimiento del cultivo (CGC), máxima cobertura del dosel (CCx), temperatura base (Tb), temperatura superior (Tsup), índice de cosecha de referencia (HI₀) tiempo a la senescencia (ts), y tiempo a la maduración (tm). Por ejemplo, una variación del coeficiente de disminución del dosel en ± 10 por ciento genera un impacto en el rendimiento de ± 3 por ciento. Por lo tanto, es un parámetro que afecta a estudios bajo diferentes tensiones de agua en el suelo. Similar a lo encontrado por Porras (2019).

Para los autores Xiuliang *et al.* (2018); Xing *et al.* (2017); Alou *et al.* (2018) establecen que los parámetros tales como índice de cosecha (HI), cobertura del dosel (CC) y productividad del agua normalizada (WP*) son los de mayor sensibilidad para la variable rendimiento. Entre tanto, para la variable biomasa, los parámetros que presentan alta sensibilidad para el modelo son: productividad de agua normalizada (WP*), coeficiente de crecimiento de cultivo (CDC) y coeficiente de cultivo (Kc).

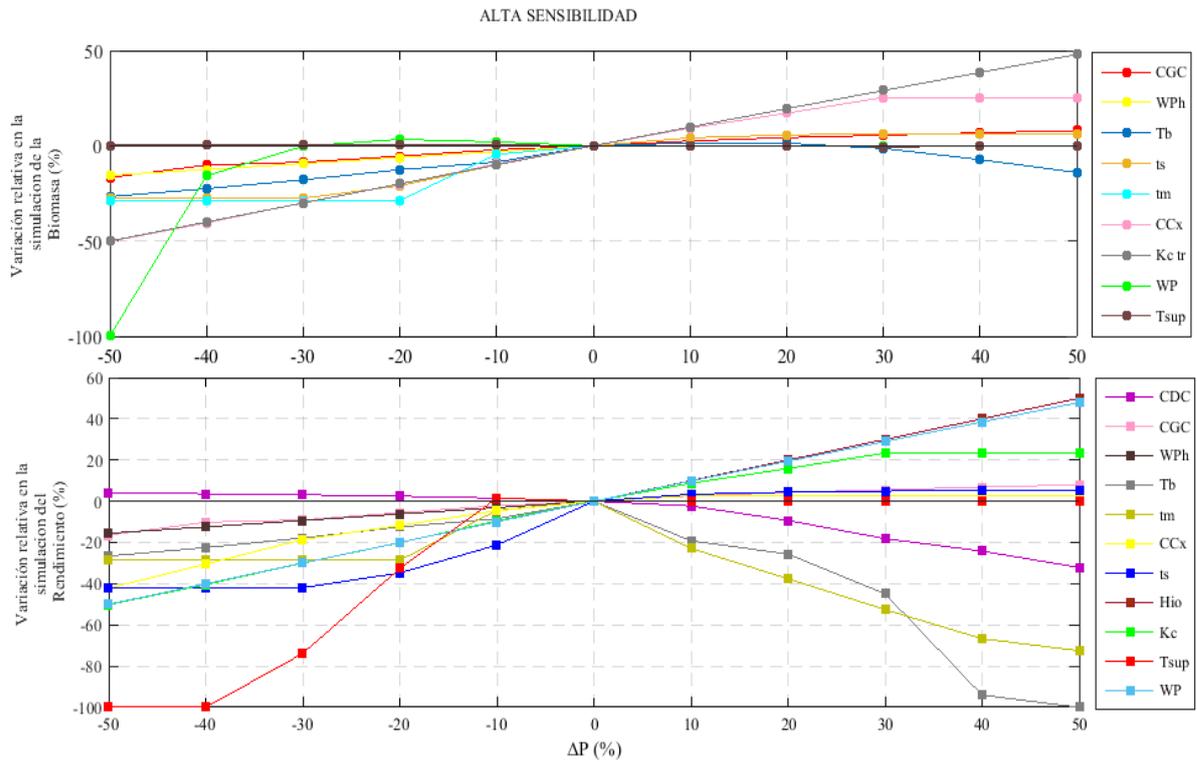


Figura 21: Parámetros de alta sensibilidad del modelo para rendimiento y biomasa en el cultivo de arroz.

En la Figura 22 se muestran los parámetros que presentan moderada sensibilidad los cuales fueron identificados por medio de variaciones en la biomasa y el rendimiento entre el 2 y el 15 por ciento. Estos parámetros fueron: tiempo desde trasplante a floración (tf), profundidad máxima de raíz (rtx), y cubierta del dosel al trasplante (CC₀). Por ejemplo, el parámetro de máxima profundidad radicular presenta moderada sensibilidad debido a que al tener mayor área de exploración radicular aumenta la cantidad de nutrientes que puede absorber, garantizando un mejor desarrollo de la planta, incremento de la tasa fotosintética y por ello mayor acumulación de materia seca y el rendimiento en general.

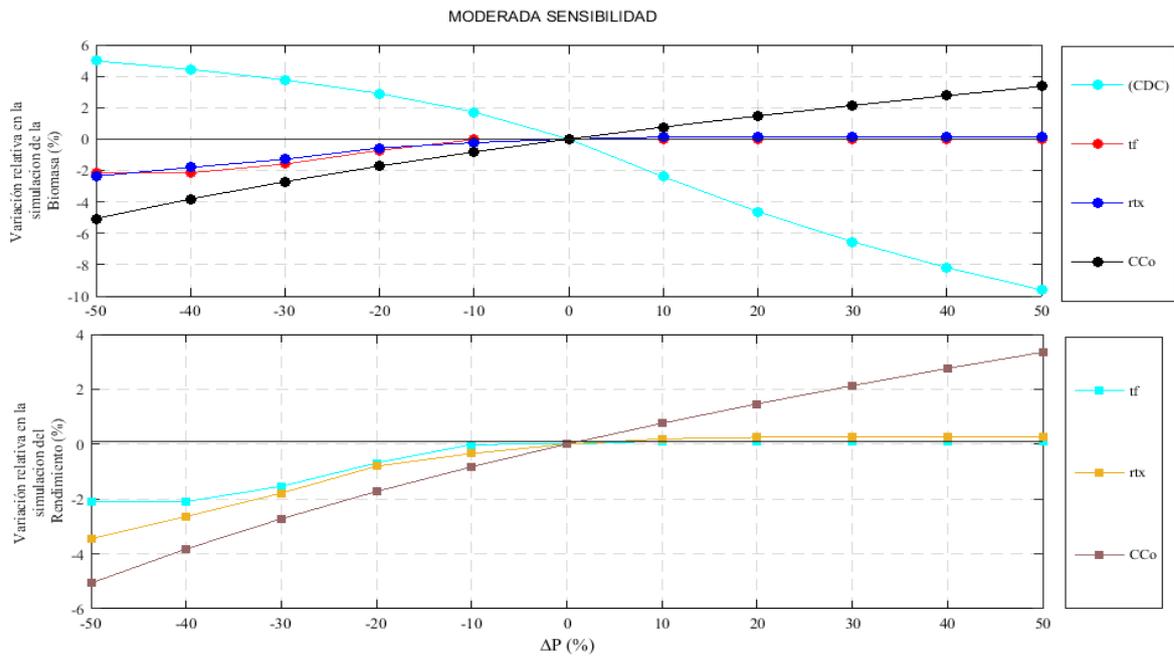


Figura 22: Parámetros de moderada sensibilidad del modelo para rendimiento y biomasa en el cultivo de arroz.

En la Figura 23 se muestran los parámetros de baja sensibilidad los cuales fueron identificados por medio de variaciones en la biomasa y el rendimiento menores al dos por ciento. Estos parámetros fueron: disminución de coeficiente de cultivo como resultado de envejecimiento (K_{cage}), tiempo de trasplante a recuperación del cultivo (t_r), efecto de la cobertura del dosel en la reducción de la evaporación del suelo en la etapa final (K_{cevap}), umbral superior de agotamiento del agua del suelo que limita con la conductancia estomática (P_{sto}), factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para el control de estoma (sf_{psto}).

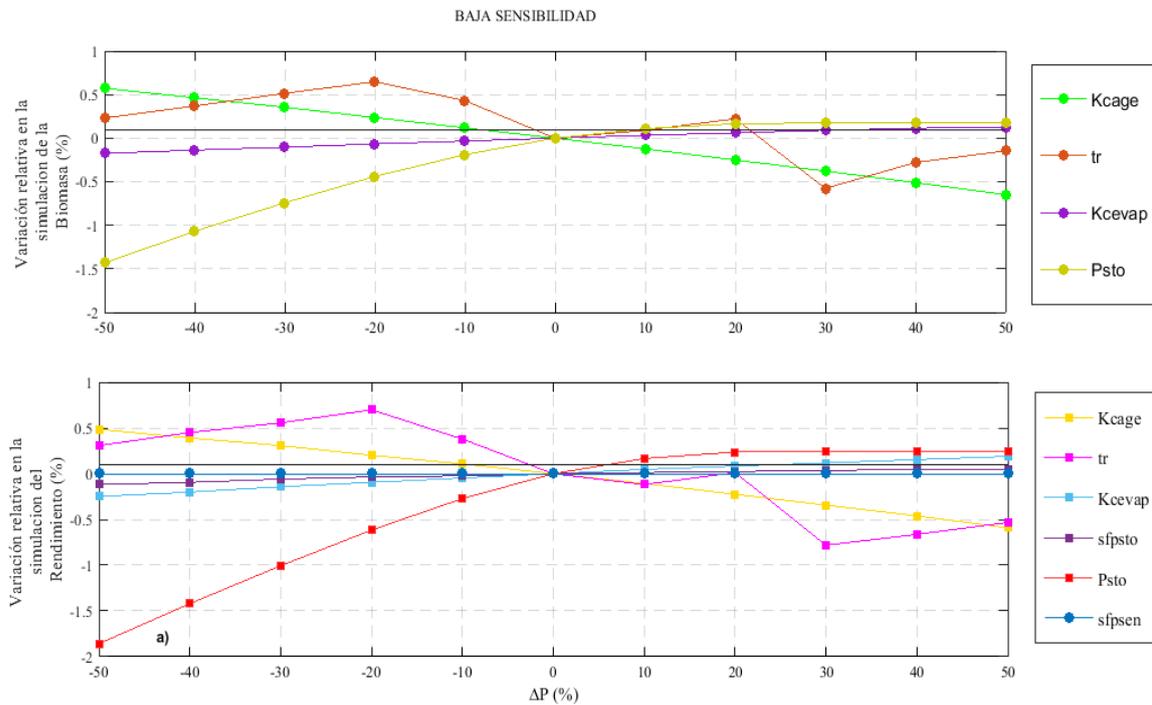


Figura 23: Parámetros de baja sensibilidad del modelo para rendimiento y biomasa en el cultivo de arroz

4.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO AQUACROP

Para lograr la calibración del modelo se hace necesario considerar los factores de ajuste establecidos por Moriasi *et al* (2007) Steduto *et al* (2012). En el Cuadro 14 y la Figura 24 se presenta la calibración del modelo mediante la variable cobertura del dosel, indicando las variables de ajuste del modelo, con valores de correlación de Pearson del orden de $R > 0.96 < 0.98$, mostrando una diferencia significativa para un alfa del cinco por ciento ($\alpha = 5\%$). De manera análoga, el NRMSE para el tratamiento testigo (T0) fue menor al 10 por ciento, lo que apunta a un desempeño “excelente”. Por otro lado, los tratamientos T1 y T2 presentaron valores de NRMSE entre el 10 y 20 por ciento, apuntando un desempeño “bueno” entre lo observado y simulado. Además, los valores de EF y del índice de agregación de Willmott presentan un ajuste de valor “Muy bueno” entre lo observado y lo simulado por Aquacrop con valores del orden de $EF > 0.93$ y $d > 0.98$. (Ver Cuadro 7)

Estudios realizados por Ran *et al.* (2018) en maíz, Shrestha *et al.* (2013) en trigo y Maniruzzaman *et al.* (2015) en el cultivo de arroz, basándose en la variable cobertura del dosel, bajo diferentes regímenes de riego, presentan factores de ajuste con valores en el orden de $EF > 0.90$, mostrando una calificación de desempeño de “Muy bueno” entre lo observado

y simulado. Asimismo, estudios realizados por Maniruzzaman *et al.* (2015); Xu *et al.* (2019); Amiri *et al.* (2014), y Pirmoradian y Davatgar (2019) en el cultivo de arroz bajo estrés hídrico, indicando valores para los factores de ajuste de modelos de cultivo como: R, NRMSE, EF y d con una calificación de desempeño de “Muy bueno” entre lo observado y lo simulado.

Cuadro 14: Índices de eficiencia de la calibración del modelo de cultivos Aquacrop para diferentes tensiones de humedad del suelo.

Índices	Cobertura del dosel		
	T0 (0 bares)	T1 (0.15 bares)	T2 (0.30 bares)
Coefficiente de Pearson (R)	0.98	0.97	0.98
NRMSE (%)	9.70	12.6	11.1
Eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (EF)	0.96	0.93	0.95
Índice de agregación de Willmott (d)	0.99	0.98	0.99

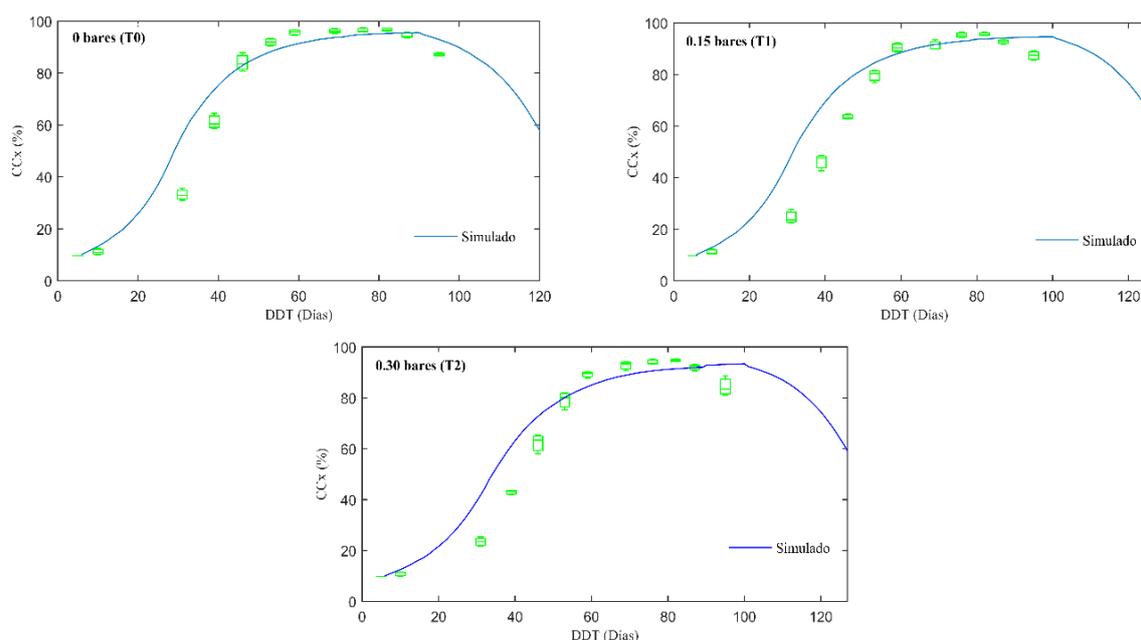


Figura 24: Variación temporal de la cobertura del dosel simulada y observada (%) durante la temporada de desarrollo del cultivo de arroz para diferentes tensiones de humedad del suelo

Cuadro 15: Biomasa, rendimiento e índice de cosecha observado y simulado.

Tratamiento	Biomasa t h ⁻¹		Rendimiento t h ⁻¹		Índice de cosecha (%)	
	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.
T0 (0 bares)	18.63	18.87	5.77	5.85	0.31	0.31
T1 (0.15 bares)	17.70	17.20	6.13	6.19	0.33	0.36
T2 (0.30 bares)	17.30	17.25	7.75	7.76	0.46	0.45

En el Cuadro 15, se muestra la comparación entre biomasa, rendimiento del grano en cascara (0 % de humedad) e índice de cosecha observado y simulado. Se hace referencia a que se presenta una leve sub y sobre estimación debido a el coeficiente de variación de los datos observados. Dichos efectos se minimizan mediante estudios bajo condiciones controladas.

Cuadro 16: Parámetros calibrados del cultivo de arroz genotipo IR 71706, bajo diferentes niveles de tensión de humedad del suelo.

Descripción	T0 (0 bares)	T1 (0.15 bares)	T2 (0.30 bares)	Unidad
Máxima cobertura del dosel	96	95	94	%
Máxima longitud de raíz	0.3	0.5	0.49	m
Mínima longitud de raíz	0.15	0.15	0.15	m
Productividad de agua (WP)	19	17	17.5	g m ⁻²
Recuperación después de trasplante	65	65	65	GDD
	6	6	6	Días
Tiempo de trasplante a máximo dosel	937	1029	1125	GDD
	70	76	83	Días
Tiempo de trasplante a inicio senescencia	1223	1366	1366	GDD
	90	100	100	Días
Tiempo de trasplante a maduración	1630	1717	1717	GDD
	120	128	128	Días
Tiempo de trasplante a floración	1154	1297	1311	GDD
	85	95	96	Días
Duración de la floración	183	190	189	GDD
	13	14	14	Días
Umbral superior para la cobertura del dosel	0.25	0.25	0.25	-
Umbral inferior para la cobertura del dosel	0.60	0.60	0.60	-
Factor de forma para la expansión del dosel	2	2	2	-
Umbral superior para cierre de estoma	0.5	0.5	0.5	-
Factor de forma para cierre de estoma	3	3	3	-
Umbral superior para senescencia precoz	0.60	0.60	0.60	-
Factor de forma para senescencia precoz	3	3	3	-

Los parámetros calibrados bajo diferentes regímenes de riego no presentan diferencias en la recuperación después de trasplante. sin embargo, hubo una leve diferencia en días y acumulación de grados de desarrollo para alcanzar la máxima cobertura del dosel, inicio de senescencia y madurez fisiológica. El ciclo productivo se alargó en 8 días como respuesta a estrés hídrico en inicio de macollamiento estableciendo una acumulación de 1630 GDD para riego continuo y 1717 GDD para tratamientos bajo tensión de humedad en el suelo. (Ver Cuadro 16). En cambio, el estudio del híbrido IR 69515-6-KKN-4-UBN-4-2-1-1-1 realizado por Maniruzzaman *et al.* (2015) indico que el estrés hídrico acorta el ciclo productivo en cuatro días donde el período productivo fue de 96 días presentando caracteres de una variedad precoz, siendo una alternativa para garantizar tres siembras anuales. Igualmente el estudio realizado por Pirmoradian y Davatgar (2019), establece que la acumulación para

inicio de senescencia y madurez fisiológica alcanza una acumulación de grados de desarrollo (GDD) del orden de 1090 y 1410 respectivamente. Del mismo modo RAES *et al.* (2018) señala que el cultivo de arroz desde trasplante hasta cosecha alcanza una acumulación de grados día de desarrollo (GDD) entre 1500 a 2000.

La máxima cobertura del dosel no presenta una diferencia entre los tratamientos con valores del orden de 95 ± 1 por ciento. No obstante, se encontró una leve diferencia en los días y acumulación de grados de desarrollo para alcanzar la máxima cobertura del dosel. En este caso el tratamiento testigo (T0) alcanza el máximo desarrollo en el menor tiempo (70 días después de trasplante), con una acumulación de 937 GDD, ver Cuadro 16. Un estudio en Bangladesh realizado por Maniruzzaman *et al.* (2015), encuentra máxima cobertura del dosel con rangos entre 92-97 por ciento logrados entre los 47-51 días después de trasplante respectivamente. Del mismo modo, Amiri *et al.* (2014), en un estudio realizado en Irán estableció una máxima cobertura del dosel del 82 por ciento.

Durante el proceso de crecimiento del cultivo de arroz la etapa más crítica del arroz es la etapa de floración. Los resultados de esta investigación presentan una pequeña diferencia entre tratamientos para alcanzar esta etapa. Los tratamientos de riego continuo (T0) y alternancia de humedecimiento y secado (T1 y T2) alcanzaron la etapa con valores de 85, 95 y 96 días hasta la floración. La acumulación de grados día de desarrollo fue de 1154, 1297 y 1311 GDD respectivamente. El período de duración de la floración (inicio primordio floral hasta la fecundación) fue de 13 ± 1 días, con una acumulación de grados día de desarrollo (GDD) de 183, 190 y 189 para los tratamientos T0, T1 y T2 respectivamente. Ver Cuadro 16. En una evaluación realizada por Amiri *et al.* (2014), se encontró una acumulación de grados día de desarrollo de aproximadamente 814 GDD a floración, encontrándose por debajo de lo encontrado en esta investigación en 340 GDD. Asimismo, el experimento realizado por Xu *et al.* (2019) indica un período de floración similar de 13 días, contrario a lo observado por Maniruzzaman *et al.* (2015), cuya floración tuvo un lapso de 10 días.

La máxima longitud radicular presentó diferencias entre los tratamientos bajo estrés hídrico (T1 y T2) y el tratamiento testigo (T0), presentando valores de 0.5 y 0.49 m para los tratamientos T1 y T2 respectivamente, mientras que para el tratamiento testigo se obtuvo una longitud de 0.3 m. La longitud radicular en el momento de trasplante para todos los tratamientos fue de 0.15 m. Ver Cuadro 16. Lo contrario ocurrió en el estudio realizado por

Maniruzzaman *et al.* (2015) en el que no se encontraron diferencias en la profundidad radicular para los tratamientos bajo diferentes regímenes hídricos. Además, el modelo Aquacrop establece un rango entre 0.3 y 0.6 m bajo sistema de riego inundado (RAES *et al.* 2018).

La productividad de agua normalizada (WP*) como base de la calibración para las variables de rendimiento y biomasa, tuvo una leve diferencia entre los diferentes regímenes hídricos. Se obtuvieron valores de 19, 17 y 17.5 g m⁻² para los tratamientos T0, T1 y T2 respectivamente. Ver Cuadro 16. Según los parámetros establecidos por el modelo Aquacrop, Raes *et al.* (2018) indica que para los cultivos que siguen el metabolismo de las plantas (C₃), se establecen valores entre 15 a 19 g m⁻².

a. Coeficiente de estrés hídrico (Ks)

En la Figura 25 se representa el coeficiente de estrés hídrico (Ks), para las diferentes tensiones de agua en el suelo, donde no se presentó estrés alguno. El estudio realizado por Zaman *et al.* (2018) indican que el cultivo de arroz es altamente sensible a estrés hídrico provocando una alteración de crecimiento, disminución de área foliar, cierre estomático, disminución de la tasa fotosintética, causando disminución de la biomasa y el rendimiento.

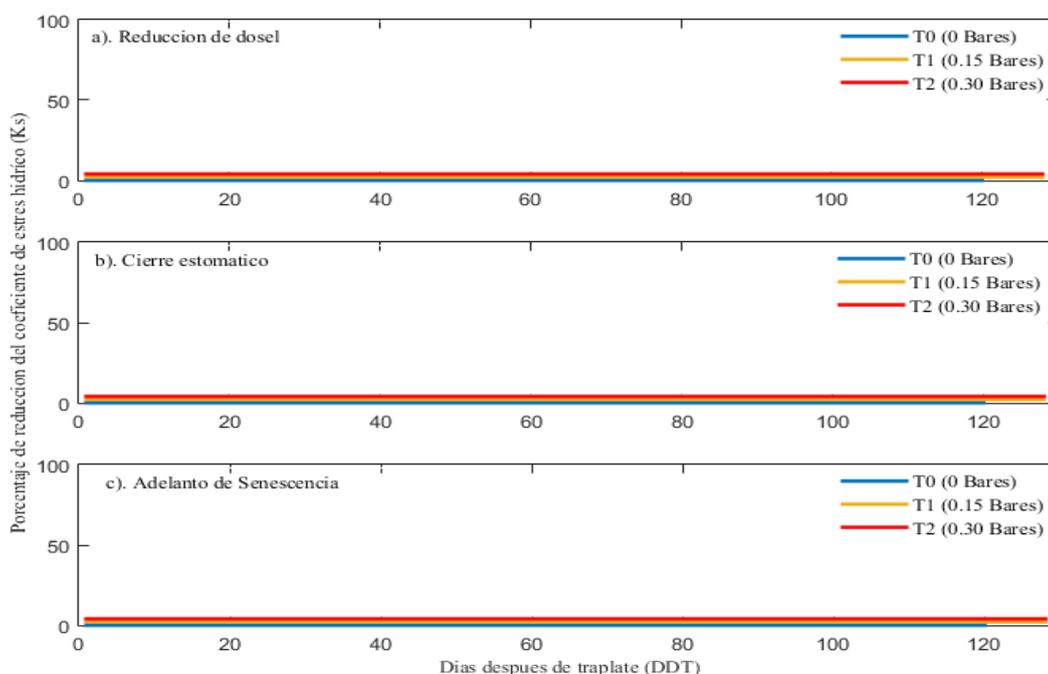


Figura 25: Porcentaje de reducción del coeficiente del estrés hídrico (Ks) por: reducción de la expansión del dosel (a) cierre estomático (b) y adelanto de senescencia (c).

En el Cuadro 16 y en la Figura 26 muestran que, en investigación, los valores del K_s para los tratamientos bajo tensión de agua en el suelo de 0, 0.15 y 0.30 bares se encuentran alrededor de uno ($K_s = 1$), no presentando síntomas de estrés hídrico por parte de la planta (disminución de cobertura del dosel, cierre de estomas y senescencia). Esto corrobora que el genotipo IR 71706 es una variedad tolerante a la sequía, debido a que no se encontraron diferencias significativas en el rendimiento. En consecuencia, se indica que la práctica de humedecimiento y secado en inicios de macollamiento es una técnica agronómica viable para lograr mejoras en el rendimiento del cultivo de arroz. Así mismo se corrobora lo encontrado por Heros *et al.* (2014) en donde establece que el genotipo IR 71706 es tolerante a la sequía, y se puede llevar a campo bajo un sistema de riego por inundación así como por un sistema siembra en base a riego por seco.

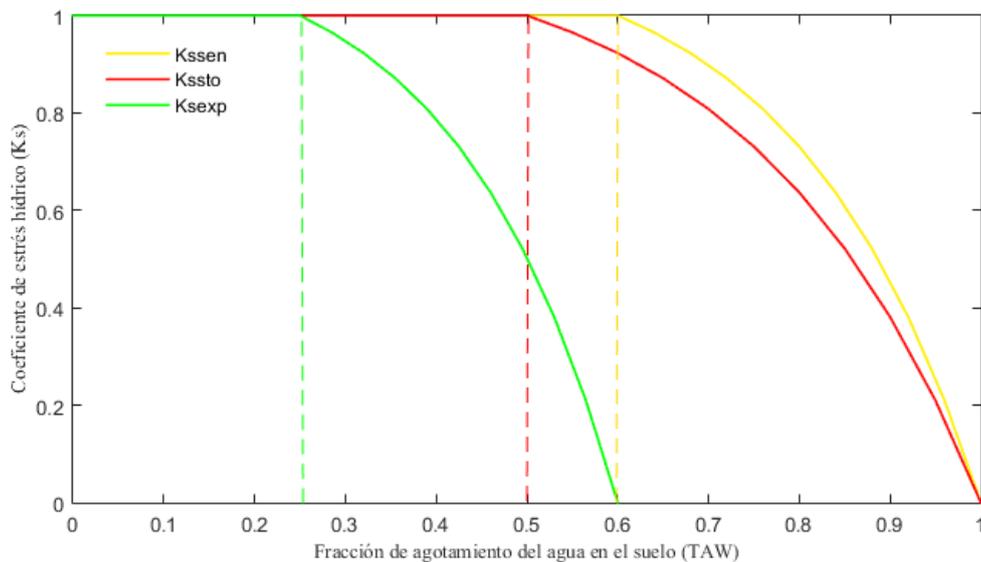


Figura 26: Variación de la curva del coeficiente de estrés hídrico (K_s) por: expansión del dosel (K_{sexp}), cierre estomático (K_{ssto}), y senescencia del dosel (K_{ssen}).

V. CONCLUSIONES

1. La práctica de riego con alternancia de humedecimiento y secado en la etapa de macollamiento, no afectó de manera significativa las siguientes variables del cultivo: la máxima cobertura de dosel, el rendimiento y la biomasa. Mientras que, si presentó diferencias significativas en el peso de mil granos y la profundidad radicular. El consumo de agua para los tratamientos T0, T1, y T2 fueron de 1830.2, 3534.1 y 3148 mm respectivamente, valores altos debido a la alta tasa de percolación con valores de 1459.4, 3137.1 y 2751.3 originado por la destrucción de la capa semipermeable (fangeo) durante la alternancia de humedecimiento y secado.
2. Los parámetros del modelo Aquacrop que presentan un alto grado de sensibilidad, para las variables del rendimiento y la biomasa son los siguientes: la productividad de agua normalizada (WP*), coeficiente de transpiración del cultivo (Kctr), coeficiente de disminución del dosel (CDC), coeficiente de crecimiento de cultivo (CGC), la máxima cobertura del dosel (CCx), temperatura base del aire (Tb), temperatura superior del aire (Tsup), índice de cosecha (HI), tiempo de trasplante a senescencia (t-s) y tiempo de trasplante a inicio de maduración (t-m).
3. La eficiencia de la calibración del modelo Aquacrop para la variable cobertura del dosel bajo diferentes tensiones del agua en el suelo (0 bares, 0.15 bares y 0.30 bares), obtuvo una calificación de “Muy bueno” a “Bueno”, con indicadores de ajuste de $EF > 0.93$, NRMSE 10 a 20%, $d > 0.98$ y un $R > 0.97$ significativo para un $\alpha = 5\%$.

VI. RECOMENDACIONES

1. Realizar el análisis de sensibilidad de parámetros del modelo empleado métodos estadísticos. Por ejemplo, Monte Carlo
2. Realizar la fase de validación del modelo en zonas productoras de arroz y áreas de muestreo mayores. Así mismo, evaluar el comportamiento del cultivo bajo la técnica de riego de humedecimiento y secado en la etapa de macollamiento, bajo tensiones de humedad en el suelo mayores a 0.30 bares
3. Efectuar el seguimiento del desarrollo del cultivo de arroz, de las variables como la biomasa, la profundidad radicular y el rendimiento, desde el trasplante hasta la madurez fisiológica, mediante técnicas destructivas.
4. Evaluar la conductancia estomática del cultivo de arroz y relacionarla con el estrés hídrico.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Alou, IN; Steyn, JM; Annandale, JG; van der Laan, M. 2018. Growth, phenological, and yield response of upland rice (*Oryza sativa* L. cv. Nerica 4®) to water stress during different growth stages. *Agricultural Water Management* 198: 39-52.

Amiri, E; Rezaei, M; Rezaei, EE; Bannayan, M. 2014. Evaluation of Ceres-Rice, Aquacrop and Oryza2000 Models in Simulation of Rice Yield Response to Different Irrigation and Nitrogen Management Strategies. *Journal of Plant Nutrition* 37(11):1749-1769

Asseng, S; Ewert, F; Rosenzweig, C; Jones, J. W., Hatfield, J. L; Ruane, A. C; Cammarano, D. 2013. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nature Climate Change*, 3(9): 827–832.

Ayers, RS; Westcot, DW. 1985. *Water Quality for Agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. Rev 29 pp 174

Bassu, S; Brisson, N; Durand, J.-L; Boote, K; Lizaso, J; Jones, J. W; Waha, K. 2014. How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors. *Global Change Biology*, 20 (7): 2301–2320.

Buitrago, IC; MacIntire, EI; Salamina, BZ. 2014. Innovación tecnológica del cultivo del Arroz, en Panamá. Panama. 140 p.

Chu, G; Chen, T; Chen, S; Xu, C; Wang, D; Zhang, X. 2018. Agronomic performance of drought-resistance rice cultivars grown under alternate wetting and drying irrigation management in southeast China. *Crop Journal* 6(5):482-494.

CIAT (Centro Tropical de Agricultura Tropical). 1985. Crecimiento y etapas del desarrollo de la planta de arroz. Guía de estudio. Serie 04SR – 05.04. 32 p.

Clay, P.; Young, K.; Taylor, E. 2006. Effect of Heat Unit Accumulation on Cotton Defoliation, Lint Yield and Fiber Quality. Arizona Cotton Report 20:245-250.

Confalonieri, R; Bellocchi, G; Bregaglio, S; Donatelli, M; Acutis, M. 2010. Comparison of sensitivity analysis techniques: A case study with the rice model WARM. Ecological Modelling 221(16):1897-1906.

Degiovanni, V.M; Gómez, J.A; Sierra, J.M. 2004. Analisis de crecimiento y etapas de desarrollo de tres variedades de arroz (*Oryza sativa* L .) en Monteria-Cordoba. Temas agrarios 9(1):21-29.

El-Habbal, I; Assistant, M; Beillard, MJ; Abdi, A. 2017. This report contains assessments of commodity and trade issues made by usda staff and not necessarily statements of official u.s. government policy. USDA Foreign Agricultural Service. Gain report. 9 p.

Esteves, A; Gelardi, D. 2008. Metodo para el calculo de grados dia de cualquier temperatura base y cualquier localidad. Avances en Energias Renovables y Medio Ambiente 12:153-158.

FAO. (Organización las Naciones Unidas para la Alimentacion y la Agricultura) 2010. El arroz y la seguridad alimentaria (en línea, sitio web). Consultado 3 jun. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/3/y5650s/y5650s05.htm>.

FAO. (Organización las Naciones Unidas para la Alimentacion y la Agricultura). (2018). Rice market monitor (en línea). 21. Italy. Consultado 31 may 2019. Disponible en www.fao.org/economic/RMM.

FAO. (Organización las Naciones Unidas para la Alimentacion y la Agricultura). 2019. Crop prospects and food situation (en línea). Italy. Consultado 31 may 2019. Disponible en www.fao.org/.

Fleisher, D. H; Condori, B; Quiroz, R; Alva, A; Asseng, S; Barreda, C; Woli, P. 2016. A potato model intercomparison across varying climates and productivity levels. Global Change Biology, 23(3):1258–1281.

Geerts, S; Raes, D; Garcia, M; Miranda, R; Cusicanqui, JA; Taboada, C; Mendoza, J; Huanca, R; Mamani, A; Condori, O; Mamani, J; Morales, B; Osco, V; Steduto, P. 2009. Simulating yield response of quinoa to water availability with aquacrop. *Agronomy Journal* 101(3):499-508.

González B; Alonso, AM. 2017. Tecnologías para ahorrar agua en el cultivo de arroz. *Nova* 13(26):67-82.

Gutierrez, P. 2018. Biofortificación agronómica del cultivo de papa mediante aplicación foliar y edáfica de Zinc y su interacción en Cadmio. *Universidad Nacional Agraria La Molina*:103.

Heros, E; Gómez, L; Sosa, G. 2014. Utilización de los índices de selección en la identificación de genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.) tolerantes a sequía. *Producción Agropecuaria y Desarrollo Sostenible* 2(2):11-31.

Heros, E. 2013. Manejo integrado en el cultivo de arroz. *Agrobanco*. 26p.

Hidalgo, R; Pozzolo, O. 2008. Más grano entero y mayor capacidad de secado de las plantas de acopio. *Tempering en Arroz*. Informe tecnico. 4p.

IICA; SRI-RICE; CONIAF; IDIAF; FEDEARROZ. 2015. Sistema intensivo del cultivo de arroz (SRI) (en línea). San José. Consultado 3 jun. 2019. Disponible en <https://infoagro.net/sites/default/files/migrate>.

INEI. (Instituto Nacional de Estadística e Informática) 2019. Producción de arroz cáscara creció 19,2% en noviembre de 2018 (En línea). Lima, Peru. Consultado 27 may 2019. Disponible en <http://www.businessempresarial.com.pe/produccion-de-arroz-cascara-crecio-192-en-noviembre-de-2018/>

Islam, MR; Sikder, S. 2011. Phenology and degree days of rice cultivars under organic culture. *Bangladesh Journal of Botany* 40(2):149-153.

Jin, X; Li, Z; Nie, C; Xu, X; Feng, H; Guo, W; Wang, J. 2018. Parameter sensitivity analysis of the Aquacrop model based on extended fourier amplitude sensitivity under different agro-

meteorological conditions and application. *Field Crops Research* 226:1-15.

Kato, Y; Katsura, K. 2014. Rice Adaptation to Aerobic Soils: Physiological Considerations and Implications for Agronomy (en línea). *Plant Production Science* 17(1):1-12.

Li, T; Hasegawa, T; Yin, X; Zhu, Y; Boote, K; Adam, M; Bouman, B. (2014). Uncertainties in predicting rice yield by current crop models under a wide range of climatic conditions. *Global Change Biology*, 21(3):1328–1341.

Maniruzzaman, M; Talukder, MSU; Khan, MH; Biswas, JC; Nemes, A. 2015. Validation of the Aquacrop model for irrigated rice production under varied water regimes in Bangladesh. *Agricultural Water Management* 159:331-340.

MINAGRI. (Ministerio de Agricultura y Riego) 2018. Arroz 2001-2017 (en línea). Lima, Peru, s.e. Disponible en http://siea.minagri.gob.pe/siea/sites/default/files/Informe-coyuntura-arroz-280818_0.pdf.

MINAGRI. (Ministerio de Agricultura y Riego). 2018. Encuesta Nacional de Intenciones de Siembra 2018(en línea). Disponible en <http://siea.minagri.gob.pe/siea/sites/default/files/>

Moriasi, D; Arnold, J; Van Liew, M; Bingner, R; Harmel, R; Veith, T. 2007. Modelo de guías de evaluación para la cuantificación sistemática de la precisión en simulaciones de cuencas hidrográficas. *Transacciones de la ASABE*. 3,885-900.

Olmos, S. 2007. Apunte de morfología, fenología, ecofisiología, y mejoramiento genético del arroz. Cátedra de Cultivos II Facultad de Ciencias Agrarias, UNNE. *Corrientes – Argentina*: 1-13.

Ordoñez, CM. 2016. Efecto del cambio climático en la evapotranspiración y rendimiento del cultivo de papa, variedad única bajo condiciones de la molina. 118 p.

Pandey, V; Shukla, A. 2015. Acclimation and Tolerance Strategies of Rice under Drought Stress. *Rice Science* 22 (4): 147-161

- Pirmoradian, N; Davatgar, N. 2019. Simulating the effects of climatic fluctuations on rice irrigation water requirement using Aquacrop. *Agricultural Water Management* 213:97-106.
- Porras, W. 2019. Desempeño del modelo Aquacrop para el cultivo de arroz bajo condiciones de humedecimiento y secado alternados en La Molina – Perú. 109 p.
- Qadir, G; Cheema, MA; Hassan, F; Ashraf, M; Wahid, MA. 2007. Relationship of heat units accumulation and fatty acid composition in sunflower. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences* 44(1):24-29.
- Raes, D; Steduto, P; Hsiao, TC. 2018. Aquacrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: Annex I. Crop parameters 19-22 p.
- Raes, D. 2017. Aquacrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: Book I. *Understanding Aquacrop*. 49 p.
- Raes, D; Steduto, P; Hsiao, TC; Fereres, E. 2009. Aquacrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. main algorithms and software description. *Agronomy Journal* 101(3):438-447.
- Ran, H; Kang, S; Li, F; Du, T; Tong, L; Li, S; Ding, R; Zhang, X. 2018. Parameterization of the Aquacrop model for full and deficit irrigated maize for seed production in arid Northwest China. *Agricultural Water Management* 203:438-450.
- Rodríguez Zurichaqui, DP. 2017. Potencial de rendimiento de líneas mutantes de arroz (*Oryza sativa* L.) desarrolladas mediante aplicación de rayos gamma en condiciones del valle de Jequetepeque. 58 p.
- Salazar, W. 2018. Respuesta del cultivo de arroz, cv ir 71706 al estrés hídrico bajo riego por goteo en la UNALM 95 p.
- Sanchez, GPO. 2012. Tablas guía para interpretación de análisis de suelos. 19 p.

Sandhu, N; Kumar, A. 2017. Bridging the Rice Yield Gaps under Drought: QTLs, Genes, and their Use in Breeding Programs. *Agronomy* 7(2):27.

Sandhu, N; Singh, V; Sihag, MK. 2019. Genomic Footprints Uncovering Abiotic Stress Tolerance in Rice. *Advances in Rice Research for Abiotic Stress Tolerance*. 737-753.

Sethi, RR; Mandal, KG; Sarangi, A; Behera, A; Aggarwal, R; Brar, AS; Sahu, AS; Bandyopadhyay, KK; Ambast, SK. 2016. Simulating paddy crop response to irrigation using FAO Aquacrop model: A case study. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 14(2):99-103.

Shrestha, N; Raes, D; Sah, SK. 2013. Strategies to Improve Cereal Production in the Terai Region (Nepal) during Dry Season: Simulations With Aquacrop. *Procedia Environmental Sciences* 19:767-775.

Steinmetz, S; Wrege, MS; Pinheiro, MJ; Ferreira, JS. 2005. Impacto do aquecimento global na redução do risco de frio em arroz irrigado no rio grande do sul. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 101(27): 4-7.

Soil Conservation Service. 1991. Soil- Plant- Water relationship. Section 15. Irrigation, *En National engineering handbook*. Soil Conservation Service, USDA Washington, DC. p. 111-156.

Steduto, P; Hsiao, TC; Fereres, E; Raes, D. 2012. Crop yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 66. 530 p.

Stella, T; Frasso, N; Negrini, G; Bregaglio, S; Cappelli, G; Acutis, M; Confalonieri, R. 2014. Model simplification and development via reuse, sensitivity analysis and composition: A case study in crop modelling. *Environmental Modelling and Software* 59:44-58.

Tubiello, FN; Ewert, F. 2002. Simulating the effects of elevated CO₂ on crops: Approaches and applications for climate change. *European Journal of Agronomy*. 18:57-74.

USDA-NCRS. 2014. *Claves para la Taxonomía de Suelos Décima segunda Edición* 410

Xing, H; Xu, X; Li, Z; Chen, Y; Feng, H; Yang, G; Chen, Z. 2017. Global sensitivity analysis of the Aquacrop model for winter wheat under different water treatments based on the extended Fourier amplitude sensitivity test. *Journal of Integrative Agriculture* 16(11):2444-2458.

Xu, J; Bai, W; Li, Y; Wang, H; Yang, S; Wei, Z. 2019. Modeling rice development and field water balance using Aquacrop model under drying-wetting cycle condition in eastern China. *Agricultural Water Management* 213:289-297.

Yzarra, W; López, F. 2012. Manual de observaciones fenológicas. Servicio de Meteorología e Hidrología – SENAMHI. 37 p.

Zaman, NK; Abdullah, MY; Othman, S; Zaman, NK. 2018. Growth and Physiological Performance of Aerobic and Lowland Rice as Affected by Water Stress at Selected Growth Stages. *Rice Science* 25(2):82-93.

Zhao, C; Liu, B; Xiao, L; Hoogenboom, G; Boote, KJ; Kassie, BT; Pavan, W; Shelia, V; Kim, KS; Hernandez-Ochoa, IM; Wallach, D; Porter, CH; Stockle, CO; Zhu, Y; Asseng, S. 2019. A SIMPLE crop model. *European Journal of Agronomy* 104:97-106.

Zhao, H; Yao, F; Zhang, Y; Xu, B; Yuan, J; Hu, Y; Xu, Y. 2007. Correlation Analysis of Rice Seed Setting Rate and Weight of 1000-Grain and Agro-Meteorology over the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, China. *Agricultural Sciences in China* 6(4):430-436.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: Análisis del agua de riego proveniente del reservorio Área Experimental de Riego y del reservorio del campo ferial UNALM.

a). Reservorio UNALM (Campo ferial)

	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 Teléfono: 614 7800 Anexo 226 Lima Email: las-fia@lamolina.edu.pe	
Nº 009022		
ANÁLISIS DE AGUA - RUTINA		
SOLICITANTE	: GERARDO FRISANCHO LARICO	
PROYECTO	: " EFECTO DEL MANEJO DEL RIEGO BAJO INUNDACIÓN Y SECAS EN LA EMISIÓN DE GASES DE INVERNADERO DEL ARROZ EN EL ADRYD"	
PROCEDENCIA	: Reservorio - Campo Ferial	
RESPONSABLE ANÁLISIS	: Ing. Nore Arévalo Flores	
FECHA DE ANÁLISIS	: La Molina, 31 de octubre de 2018	
Nº LABORATORIO	9022	
Nº DE CAMPO	Agua	
CE mmhos/cm	0.62	
pH	8.16	
Calcio meq/l	4.53	
Magnesio meq/l	0.66	
Sodio meq/l	0.83	
Potasio meq/l	0.13	
SUMA DE CATIONES	6.14	
Cloruro meq/l	0.92	
Sulfato meq/l	3.38	
Bicarbonato meq/l	1.73	
Nitratos meq/l	0.01	
Carbonatos meq/l	0.00	
SUMA DE ANIONES	6.04	
SAR	0.51	
CLASIFICACION	C2-S1	
Boro mg/L	0.11	

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE AGUA Y SUELO
Ing. Msc. Miguel A. Sanchez Delgado
JEFE DE LABORATORIO



B). Reservorio AER



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

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

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



Nº 008372

ANALISIS DE AGUA - RUTINA

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

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

LABORATORIO DE ANALISIS DE AGUA Y SUELO

Ing. Msc. Teresa Velásquez Bejarano
 JEFE DE LABORATORIO



ANEXO 2: Análisis del suelo



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

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

Av. La Molina s/n Teléfono: 614 7800 Anexo 226 Lima Email: las-fia@lamolina.edu.pe

Análisis de Suelo - Salinidad y Sodicidad



Nº 013413

SOLICITANTE : DRA. LIA RAMOS FERNANDEZ
 PROCEDENCIA : Lima - ADYAER (Area Demostrativa y Area Experimental de Riego)
 RESP. ANALISIS : Ing. Elizabeth Monterrey Porras
 FECHA DE ANALISIS : La Molina, 27 de Noviembre de 2017

Número de muestra		CE dS / m Relación 1:1	Análisis Mecánico				pH Relación 1:1	MO %	P ppm	K ₂ O ppm	CaCO ₃ %	Cambiables					
Lab.	Campo		Arena %	Limo %	Arcilla %	Textura						CIC TOTAL	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺ +H ⁺
13413	M-2	0.93	58.56	23.00	18.44	Franco arenoso	7.98	2.30	48.69	372.00	0.99	10.36	8.35	1.39	0.13	0.50	-

MUESTRA		Saturación %	pH Suelo : Agua 1:3	C.E. dS/m 1:3	CATIONES SOLUBLES (meq/l)					ANIONES SOLUBLES (meq/l)					Yeso Soluble %	Boro Soluble ppm	
Lab	Campo				Ca ⁺⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	SUMA	Cl ⁻	SO ₄ ⁺⁺	CO ₃ ⁺⁺	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻			SUMA
13413	M-2	40.50	7.62	1.76	10.65	3.25	1.08	2.61	17.59	8.46	4.17	0.00	4.98	0.06	17.67	0.03	0.08

Parametros Hidricos	
Cc (%)	16.54
Pm (%)	8.78

Parcela

LABORATORIO DE ANALISIS DE AGUA Y SUELO

Ing. Msc. Teresa Velásquez Bejarano
 JEFE DE LABORATORIO



ANEXO 3: Condiciones meteorológicas: temperatura máxima y mínima, (°T), precipitación (Pp), -humedad relativa (HR) y evapotranspiración (mm).

Fec ^{ha}	DDS	T Min (°C)	T Max (°C)	Pp (mm)	H. R (%)	Vv (m/s)	Eto (mm)
15/11/2017	0	15.9	22.8	0	78	0.8	2.91
16/11/2017	1	15.3	21.8	0	82	0.7	2.84
17/11/2017	2	16.6	23.2	0	82	0.7	2.48
18/11/2017	3	16.2	22.4	0	84	0.8	2.69
19/11/2017	4	16.3	22.1	0	86	0.6	1.97
20/11/2017	5	15.3	23.8	0	83	0.6	2.8
21/11/2017	6	16.5	23.5	0	84	0.8	2.54
22/11/2017	7	16.3	20	0.2	86	0.5	1.55
23/11/2017	8	17.4	24.1	0	77	0.7	2.51
24/11/2017	9	16.2	23.7	0	81	0.7	2.63
25/11/2017	10	15.8	22.9	0	84	0.6	2.65
26/11/2017	11	15.7	24.7	0	83	0.7	3.01
27/11/2017	12	16.7	23.4	0	83	0.8	3
28/11/2017	13	16.3	23.2	0	84	0.6	1.95
29/11/2017	14	16.6	23.6	0	83	0.9	3.17
30/11/2017	15	17.1	23.4	0	85	0.8	2.25
1/12/2017	16	16.9	24	0	82	0.8	2.56
2/12/2017	17	16.3	24.4	0	84	0.7	2.93
3/12/2017	18	16.9	24.9	0	84	0.8	3.17
4/12/2017	19	16.9	22.9	0	86	0.7	2.22
5/12/2017	20	17.4	20.4	0	88	0.5	1.52
6/12/2017	21	17.2	22.7	0	86	0.6	1.67
7/12/2017	22	17.2	24.2	0	86	0.6	2.34
8/12/2017	23	16.8	23	0	86	0.7	2.6
9/12/2017	24	16.3	23.1	0	86	0.6	2.48
10/12/2017	25	16.1	23.2	0	84	0.6	2.6
11/12/2017	26	16.5	22.1	0	84	0.5	1.56
12/12/2017	27	16.3	25.3	0	82	0.7	3.25
13/12/2017	28	17.10	24.00	0.00	83.04	0.77	2.87
14/12/2017	29	17.60	25.80	0.00	82.56	0.75	3.40
15/12/2017	30	18.20	23.60	0.00	84.48	0.95	2.43
16/12/2017	31	17.30	20.10	0.20	89.21	0.49	1.48
17/12/2017	32	18.30	24.10	0.00	82.71	0.53	1.99
18/12/2017	33	17.10	25.20	0.00	80.10	0.73	3.04
19/12/2017	34	17.80	24.90	0.00	79.81	0.68	2.26
20/12/2017	35	17.90	26.20	0.00	80.25	0.77	3.13
21/12/2017	36	19.20	26.40	0.00	71.27	0.72	3.57

<<Continuación>>							
22/12/2017	37	19.00	26.20	0.00	77.44	0.81	3.51
23/12/2017	38	18.60	25.40	0.00	84.31	0.79	3.22
24/12/2017	39	18.80	23.80	0.00	85.71	0.63	1.98
25/12/2017	40	18.40	23.80	0.00	84.58	0.45	1.61
26/12/2017	41	18.20	23.80	0.00	82.85	0.52	1.64
27/12/2017	42	19.10	27.30	0.00	79.96	0.71	2.22
28/12/2017	43	18.90	26.10	0.00	82.98	0.71	2.47
29/12/2017	44	19.00	22.30	0.00	86.02	0.49	1.58
30/12/2017	45	18.70	21.70	0.00	88.60	0.40	1.54
31/12/2017	46	17.60	26.80	0.00	82.31	0.60	2.71
1/01/2018	47	19.90	26.40	0.00	76.94	0.61	1.91
2/01/2018	48	19.90	27.60	0.00	75.48	0.64	2.76
3/01/2018	49	18.50	25.70	0.00	83.38	0.76	3.15
4/01/2018	50	20.20	24.20	0.00	82.06	0.57	1.71
5/01/2018	51	20.00	25.90	0.00	79.33	0.63	2.40
6/01/2018	52	19.60	27.40	0.00	77.56	0.61	2.79
7/01/2018	53	19.60	26.10	0.00	80.19	0.60	2.32
8/01/2018	54	19.60	26.70	0.00	78.79	0.59	2.63
9/01/2018	55	19.40	28.10	0.00	79.67	0.59	3.08
10/01/2018	56	19.60	26.70	0.40	81.56	0.66	2.36
11/01/2018	57	20.10	27.50	0.00	77.33	0.74	3.41
12/01/2018	58	20.20	26.90	0.00	81.04	0.77	3.07
13/01/2018	59	19.20	26.70	0.00	80.50	0.62	3.36
14/01/2018	60	19.30	26.90	0.00	78.04	0.53	2.74
15/01/2018	61	19.30	26.80	0.00	75.90	0.60	2.10
16/01/2018	62	19.60	28.80	0.00	73.65	0.76	3.98
17/01/2018	63	19.20	25.50	0.00	80.42	0.52	2.32
18/01/2018	64	18.40	26.30	0.00	81.13	0.53	2.34
19/01/2018	65	19.10	26.30	0.20	80.50	0.57	3.06
20/01/2018	66	20.10	27.20	0.00	77.60	0.52	2.30
21/01/2018	67	20.50	26.80	0.00	75.08	0.61	3.31
22/01/2018	68	19.90	27.10	0.20	82.08	0.26	1.93
23/01/2018	69	20.30	28.60	0.00	76.15	0.46	2.82
24/01/2018	70	19.70	28.30	0.00	72.38	0.57	3.88
25/01/2018	71	20.60	29.10	0.00	70.48	0.67	3.79
26/01/2018	72	20.20	28.00	0.00	77.67	0.63	3.47
27/01/2018	73	20.10	27.60	0.00	79.71	0.75	3.83
28/01/2018	74	19.40	26.70	0.00	80.77	0.68	3.48
29/01/2018	75	19.70	28.30	0.00	76.77	0.67	2.93
30/01/2018	76	20.30	28.50	0.00	75.65	0.64	3.90
31/01/2018	77	20.10	27.70	0.00	77.65	0.79	3.92
1/02/2018	78	19.50	26.30	0.00	81.00	0.75	3.23
2/02/2018	79	19.50	26.80	0.00	79.35	0.73	3.43
3/02/2018	80	20.60	26.60	0.00	74.56	0.34	1.88

<<Continuación>>

4/02/2018	81	21.80	29.20	0.00	69.92	0.45	2.40
5/02/2018	82	21.10	28.10	0.00	72.46	0.67	2.81
6/02/2018	83	20.80	27.20	0.00	74.46	0.69	2.91
7/02/2018	84	20.70	27.90	0.00	76.65	0.63	2.82
8/02/2018	85	20.30	28.10	0.00	77.48	0.68	2.88
9/02/2018	86	19.80	28.20	0.00	75.75	0.73	2.94
10/02/2018	87	20.70	29.00	0.00	74.77	0.54	2.79
11/02/2018	88	20.70	28.10	0.00	75.77	0.73	3.03
12/02/2018	89	20.70	28.10	0.00	77.02	0.69	2.72
13/02/2018	90	21.20	30.10	0.00	73.79	0.56	2.80
14/02/2018	91	22.40	28.50	0.00	77.55	0.68	3.35
15/02/2018	92	22.70	28.30	0.00	76.50	0.68	3.18
16/02/2018	93	23.70	29.80	0.00	80.72	0.60	3.49
17/02/2018	94	22.80	28.70	0.00	79.66	0.68	3.64
18/02/2018	95	23.70	26.20	0.00	84.41	0.40	2.23
19/02/2018	96	23.30	29.20	0.00	79.14	0.48	2.51
20/02/2018	97	21.60	29.40	0.00	80.72	0.68	3.88
21/02/2018	98	22.50	28.60	0.00	77.55	0.60	4.28
22/02/2018	99	21.30	27.80	0.00	81.77	0.56	2.95
23/02/2018	100	22.20	27.80	0.70	76.50	0.52	2.42
24/02/2018	101	22.30	29.90	0.00	73.87	0.60	3.66
25/02/2018	102	21.70	28.70	0.00	76.50	0.68	3.10
26/02/2018	103	23.40	27.90	0.00	74.92	0.64	3.24
27/02/2018	104	24.00	28.70	0.30	74.39	0.60	3.24
28/02/2018	105	21.70	27.20	0.00	77.55	0.60	3.75
1/03/2018	106	20.80	27.60	0.00	75.83	0.63	4.12
2/03/2018	107	19.40	27.00	0.00	78.60	0.70	4.34
3/03/2018	108	20.50	26.70	0.00	79.96	0.74	3.99
4/03/2018	109	20.30	27.30	0.00	79.21	0.74	3.57
5/03/2018	110	19.60	27.00	0.00	81.04	0.55	2.54
6/03/2018	111	19.40	27.50	0.00	77.92	0.47	2.43
7/03/2018	112	19.60	27.80	0.00	73.73	0.60	3.77
8/03/2018	113	20.40	28.80	0.00	71.04	0.55	4.64
9/03/2018	114	20.80	29.20	0.00	73.19	0.51	3.46
10/03/2018	115	19.30	27.90	0.20	76.69	0.52	4.35
11/03/2018	116	19.80	27.60	0.00	79.85	0.50	3.76
12/03/2018	117	19.90	26.30	0.00	82.15	0.41	2.15
13/03/2018	118	20.00	27.80	0.00	73.79	0.53	3.23
14/03/2018	119	18.90	29.30	1.20	75.09	0.48	3.97
15/03/2018	120	19.80	29.20	1.80	76.20	0.44	4.04
16/03/2018	121	21.10	29.50	0.00	68.65	0.79	3.54
17/03/2018	122	21.40	28.80	0.00	74.79	0.57	2.80
18/03/2018	123	21.20	28.80	0.00	71.54	0.65	3.94
19/03/2018	124	20.20	28.80	0.00	75.97	0.62	3.38
20/03/2018	125	19.90	28.60	0.00	76.57	0.68	3.97

<<Continuación>>

21/03/2018	126	19.20	27.20	0.00	74.51	0.70	3.06
22/03/2018	127	19.70	26.70	0.00	73.74	0.66	3.58
23/03/2018	128	20.00	27.20	0.00	71.15	0.64	3.99
24/03/2018	129	20.20	28.80	0.00	71.06	0.67	3.33
25/03/2018	130	20.20	28.60	0.00	69.63	0.61	4.46
26/03/2018	131	19.40	27.80	0.00	75.23	0.56	4.24
27/03/2018	132	20.10	28.40	0.00	72.39	0.60	4.47
28/03/2018	133	19.30	29.30	0.00	71.25	0.68	4.60
29/03/2018	134	19.30	26.80	0.00	77.49	0.76	4.58
30/03/2018	135	18.30	26.50	0.00	78.69	0.65	3.87
31/03/2018	136	18.20	26.10	0.00	76.68	0.64	4.39
1/04/2018	137	19.40	27.40	0.00	75.43	0.64	3.71
2/04/2018	138	19.80	27.60	0.00	77.83	0.58	2.27
3/04/2018	139	19.00	27.40	0.00	77.77	0.63	3.04
4/04/2018	140	19.20	27.10	0.00	76.71	0.62	3.59
5/04/2018	141	18.30	28.10	0.00	74.70	0.85	3.40
6/04/2018	142	19.10	28.20	0.00	76.65	0.49	4.21
7/04/2018	143	19.10	27.10	0.00	71.26	0.60	4.54
8/04/2018	144	19.10	26.70	0.00	75.61	0.58	4.26
9/04/2018	145	19.20	27.50	0.00	75.12	0.56	2.71
10/04/2018	146	19.70	27.70	0.00	71.29	0.67	4.48
11/04/2018	147	18.10	27.60	0.00	79.46	0.61	4.51
12/04/2018	148	18.10	26.40	0.00	77.92	0.65	3.40
13/04/2018	149	17.90	25.80	0.00	78.90	0.57	3.45
14/04/2018	150	18.70	28.10	0.00	78.45	0.62	3.45
15/04/2018	151	17.90	27.40	0.00	78.61	0.61	4.50
16/04/2018	152	17.70	26.30	0.00	80.54	0.61	4.41
17/04/2018	153	17.60	26.70	0.00	78.79	0.59	4.36
18/04/2018	154	17.60	26.70	0.00	75.09	0.53	4.41
19/04/2018	155	17.30	25.60	0.00	76.63	0.57	4.26
20/04/2018	156	18.20	26.70	0.00	77.07	0.63	4.13
21/04/2018	157	18.50	27.50	0.00	80.45	0.51	4.61

Fuente: con data de la estación automática Davis (AER)

ANEXO 4: Análisis estadístico.

a. Análisis de la varianza para rendimiento del cultivo

Fuente de variación	G. L	S.C	C.M	F calc	Pr > F
Modelo	2.00	3.24	1.62	14.27	0.4066
Tratamiento	2.00	3.24	1.62	14.27	0.4066
Error	6.00	9.26	1.54		
Total	8.00	12.5			
Coefficiente de variación (%)	16.07				

Fuente: Elaborado con programa estadístico InfoStat.

b. Prueba de Tukey para el rendimiento del cultivo con 5% de probabilidad

Tratamiento	Rendimiento t ha ⁻¹	N	E. E
T0	7.27	3	0.72 A
T1	7.33	3	0.72 A
T2	8.58	3	0.72 A

Fuente: Elaborado con programa estadístico InfoStat.

a. Análisis de la varianza para la variable peso de mil granos

Fuente de variación	G. L	S.C	C.M	F calc	Pr > F
Modelo	2.00	5.71	2.85	1.05	0.0052
Tratamiento	2.00	5.71	2.85	1.05	0.0052
Error	6.00	1.20	0.20		
Total	8.00	6.91			
Coefficiente de variación (%)	1.77				

Fuente: Elaborado con programa estadístico InfoStat.

b. Prueba de Tukey para la variable peso de mil granos con 5% de probabilidad

Tratamiento	Rendimiento 100 granos gr	N	E. E
T1	24.57	3	0.26 A
T2	24.73	3	0.26 A
T0	26.33	3	0.26 B

Fuente: Elaborado con programa estadístico InfoStat.

c. Análisis de la varianza para variable biomasa

Fuente de variación	G. L	S.C	C.M	F calc	Pr > F
Modelo	2	12.03	6.01	0.59	0.5585
Tratamiento	2	12.03	6.01	0.59	0.5585
Error	40	406.68	10.17		
Total	42	418.7			
Coefficiente de variación (%)	17.86				

Fuente: Elaborado con programa estadístico InfoStat.

d. Prueba de Tukey para variable biomasa con 5% de probabilidad

Tratamiento	Biomasa t ha ⁻¹	N	E. E
T2	17.36	3	0.80 A
T1	17.70	3	0.85 A
T0	18.63	3	0.88 A

Fuente: Elaborado con programa estadístico InfoStat.

e. Análisis de la varianza para profundidad de la raíz

Fuente de variación	G. L	S.C	C.M	F calc	Pr > F
Modelo	2.0	3860.31	1930.161	262.07	< 0.0001
Tratamiento	2.0	3860.31	930.16	262.07	< 0.0001
Error	42	309.33	7.37		
Total	44	4169.64			
Coefficiente de variación (%)	6.3				

Fuente: Elaborado con programa estadístico InfoStat.

f. Prueba de Tukey para variable profundidad de la raíz con 5% de probabilidad

Tratamiento	Profundidad de raíz (cm)	N	E.E
T0	30	15	0.7 A
T2	49.2	15	0.7 B
T1	50.07	15	0.7 B

Fuente: Elaborado con programa estadístico InfoStat.

g. Análisis de la varianza para eficiencia de uso de agua

Fuente de variación	G. L	S.C	C.M	F calc	Pr > F
Modelo	2	0.01	0.01	4.76	0.0577
Tratamiento	2	0.01	0.01	4.76	0.0577
Error	6	0.01	1.4 E ⁻³		
Total	8	0.02			
Coefficiente de variación (%)	15.94				

Fuente: Elaborado con programa estadístico InfoStat.

h. Resultados de la prueba T-Student para cuantificar el grado de dependencia de los valores medios de la cobertura del dosel (CC) observados y simulados

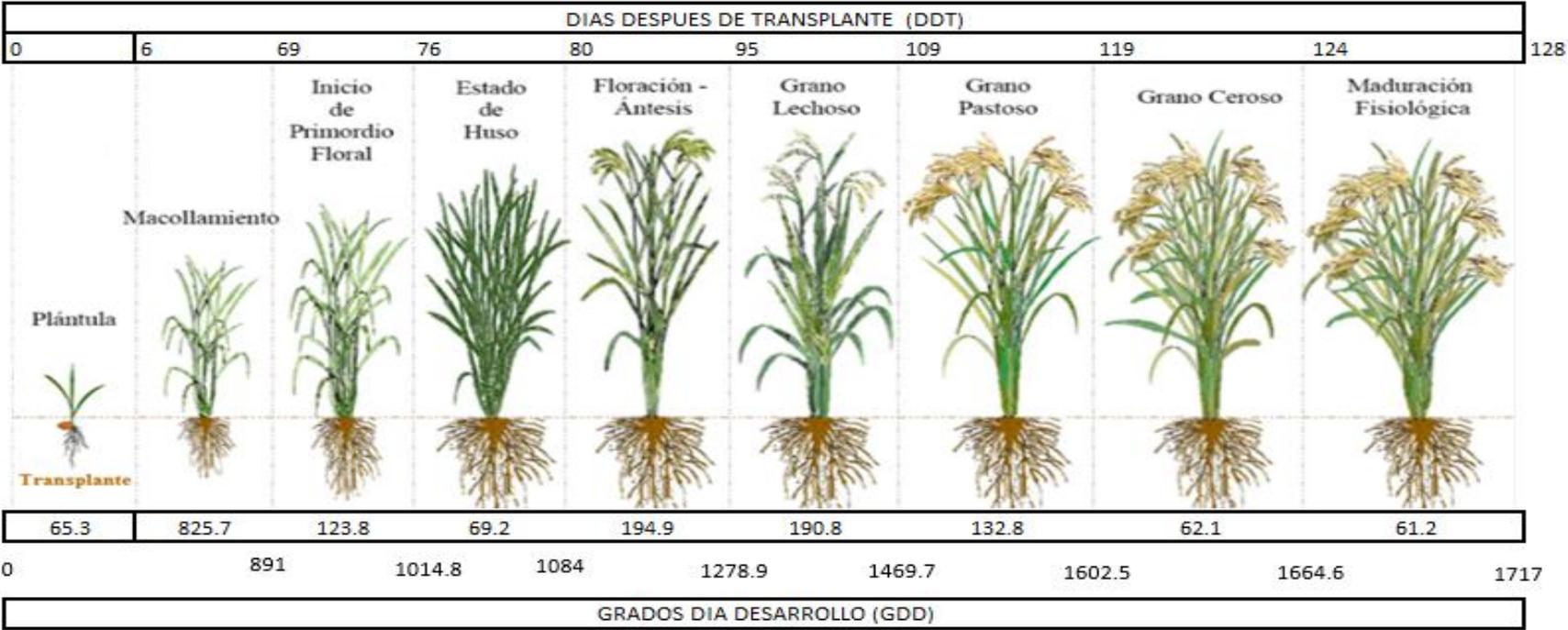
ANEXO 5: Grado de la cobertura del dosel (CC) (%).

Prueba estadística T-Student	T0 (0 bares)		T1 (0.15 bares)		T2 (0.30 bares)	
	Media observada	Media Simulada	Media observada	Media Simulada	Media observada	Media Simulada
Media	77.0954	79.2363	73.0727	70.7084	69.5909	69.6175
Varianza	866.7313	753.4705	764.3741	919.1704	763.4189	931.1137
Observaciones	11	11	11	11	11	11
Coefficiente de correlación de Pearson	0.9852		0.9825		0.9831	
Diferencia hipotética de las medias	0		0		0	
Grados de libertad	20		20		20	
Estadístico t	-1.3475		0.1911		-0.0021	
Valor crítico de t de tabla	2.0859		2.0859		2.0859	
Nivel de significancia	Correlación positiva significancia (Estadístico $t \leq t$ tabla)		Correlación positiva significancia (Estadístico $t \leq t$ tabla)		Correlación positiva significancia (Estadístico $t \leq t$ tabla)	

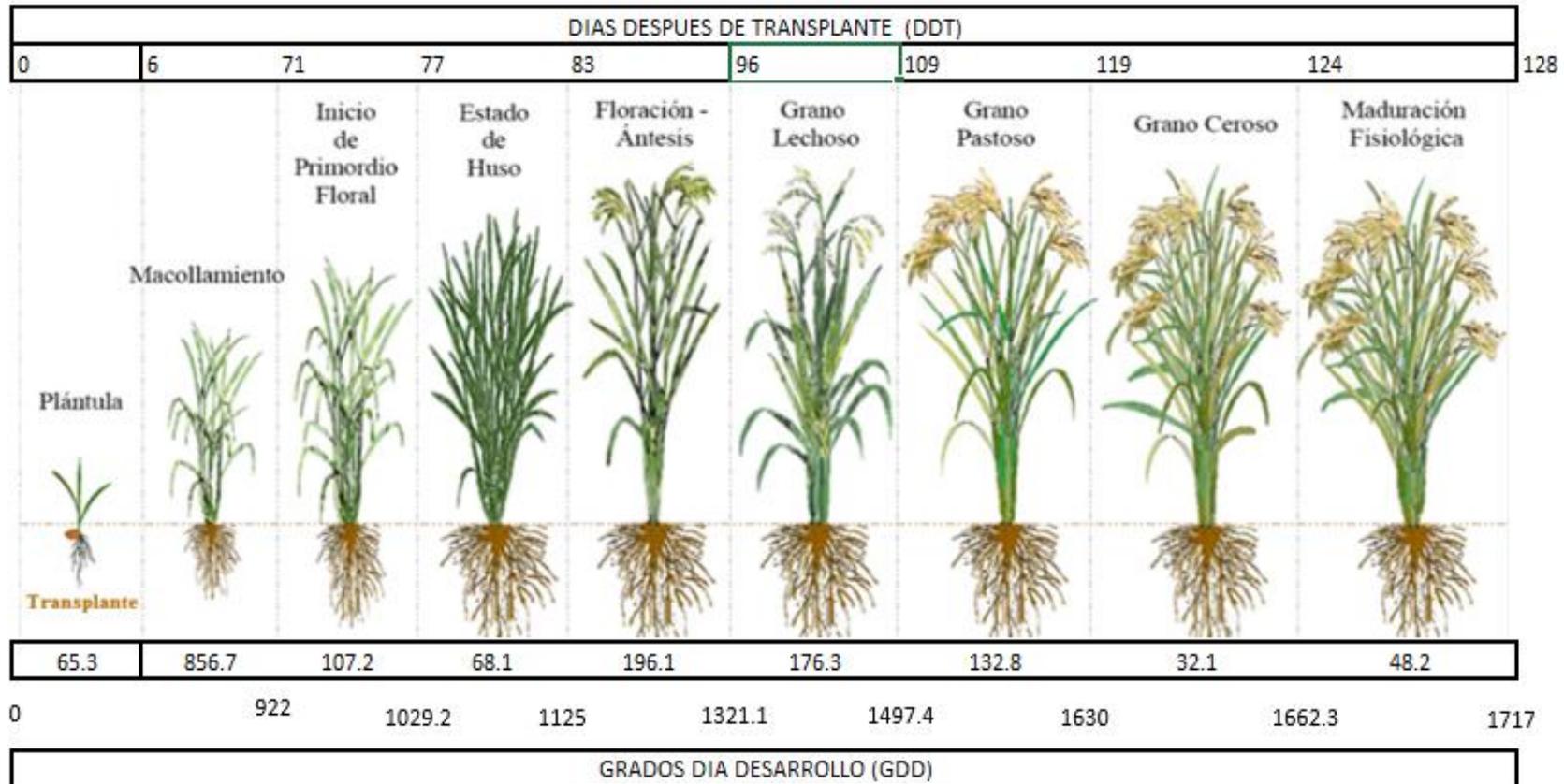
Fecha	DDS	T0	T1	T2
19/12/2017	34	11.2	11.2	10.9
10/01/2018	56	33.2	24.6	23.4
17/01/2018	63	61.2	46.2	42.9
24/01/2018	70	84.0	63.6	62.2
31/01/2018	77	91.9	79.6	79.2
6/02/2018	83	95.6	90.4	89.2
16/02/2018	93	96.2	91.2	92.8
23/02/2018	100	96.4	95.4	94.1
1/03/2018	106	96.6	95.7	94.7
6/03/2018	111	94.5	92.6	92.0
14/03/2018	119	87.2	87.3	84.4

ANEXO 6: Fenología del cultivo de arroz bajo tensión de humedad del suelo de 0.15 bares (T1) y 0.30 bares (T2)

a. 0.15 bares (T1)

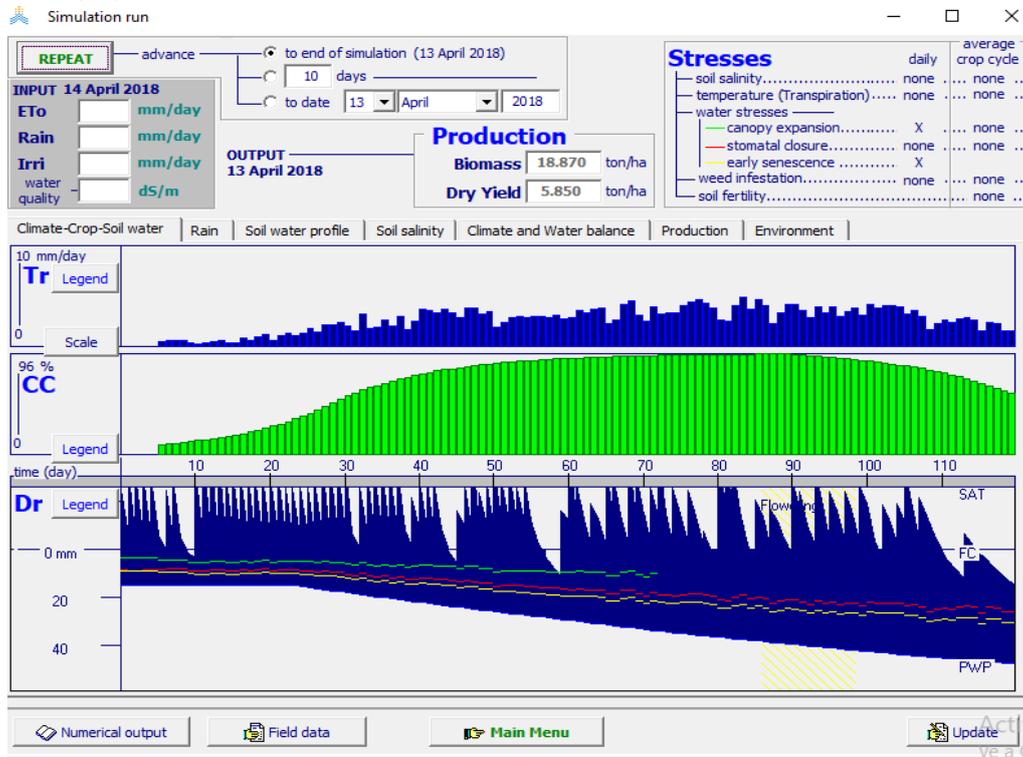


b. 0.30 bares (T2)



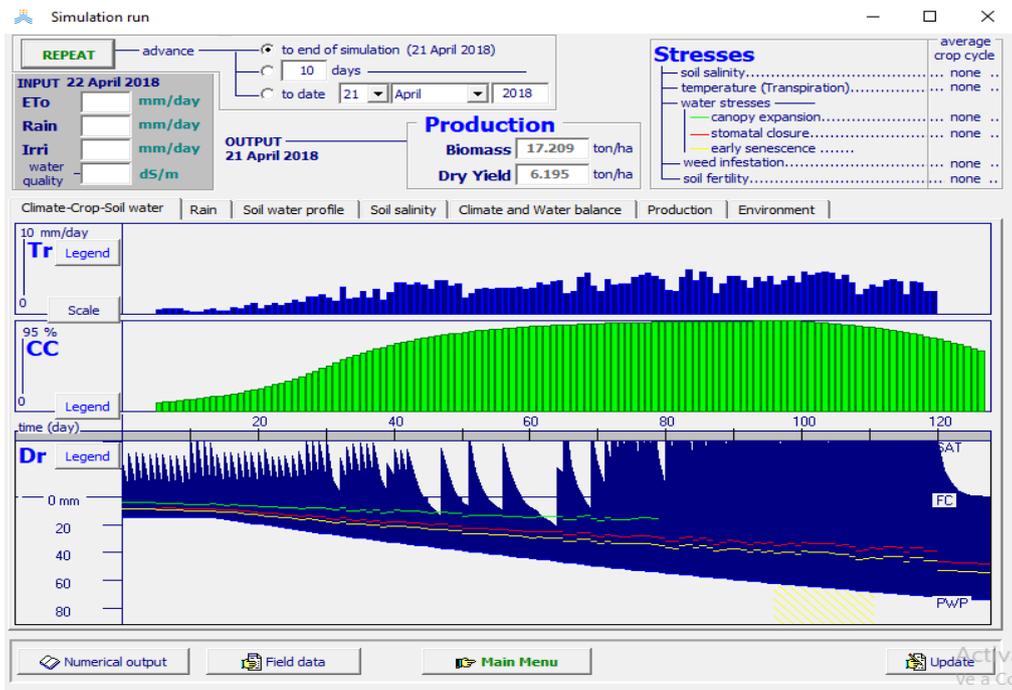
ANEXO 7: Simulación del modelo Aquacrop para tensión de humedad del suelo, 0, 0.15 y 0.30 bares

a. 0 bares (T0)



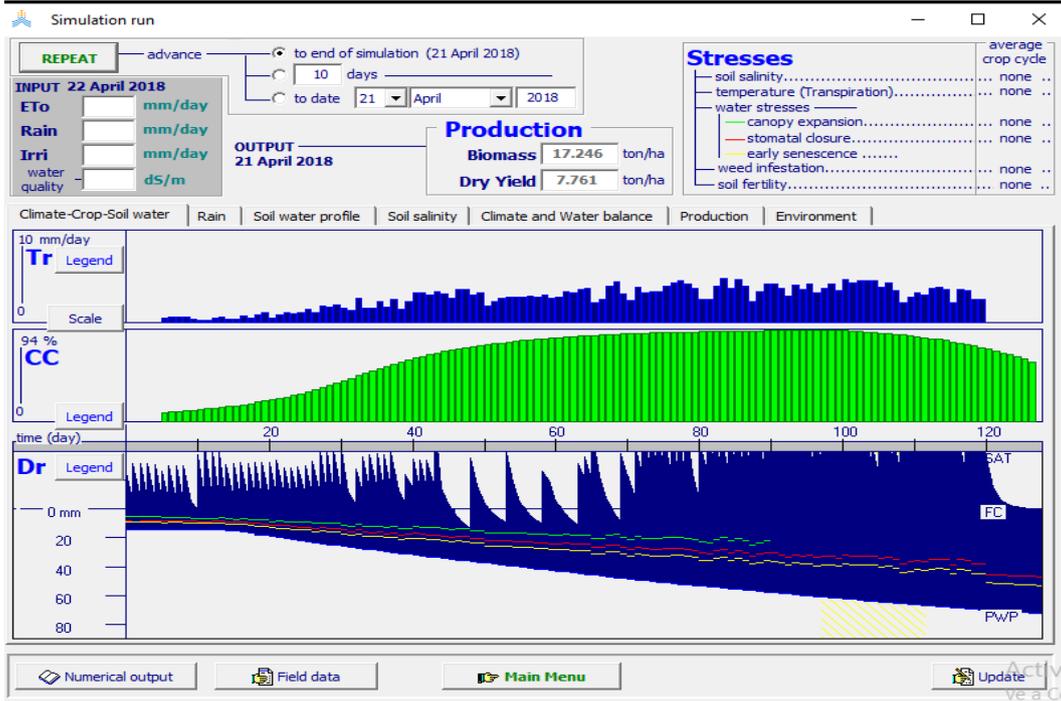
Fuente: Elaborado por software Aquacrop

b. 0.15 bares (T1)



Fuente: Elaborado por software Aquacrop

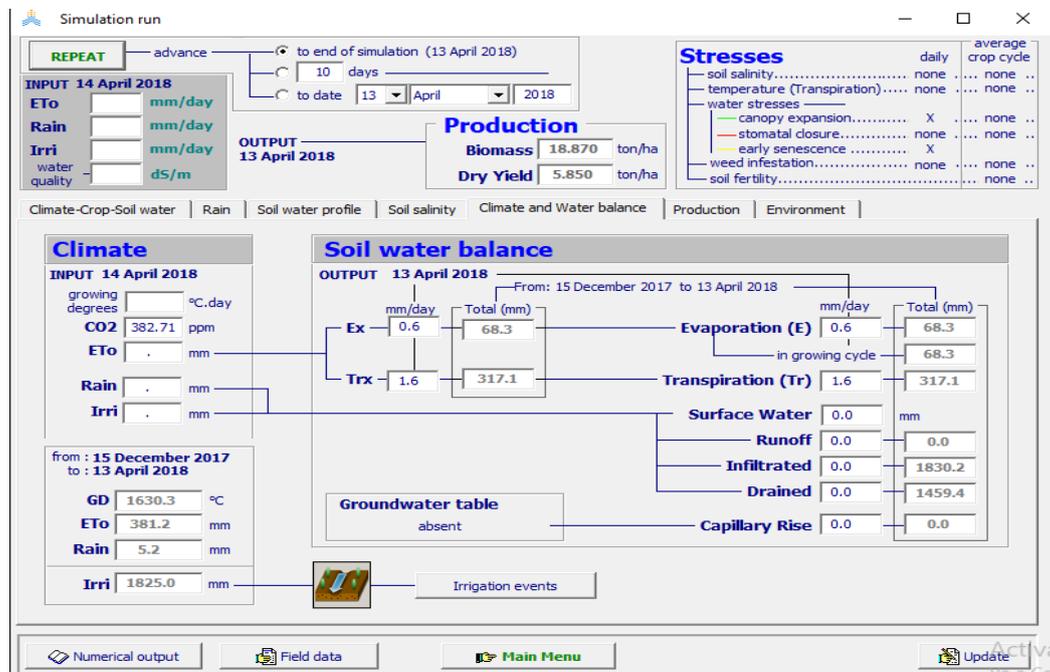
c. 0.30 bares (T2)



Fuente: Fuente: Elaborado por software Aquacrop

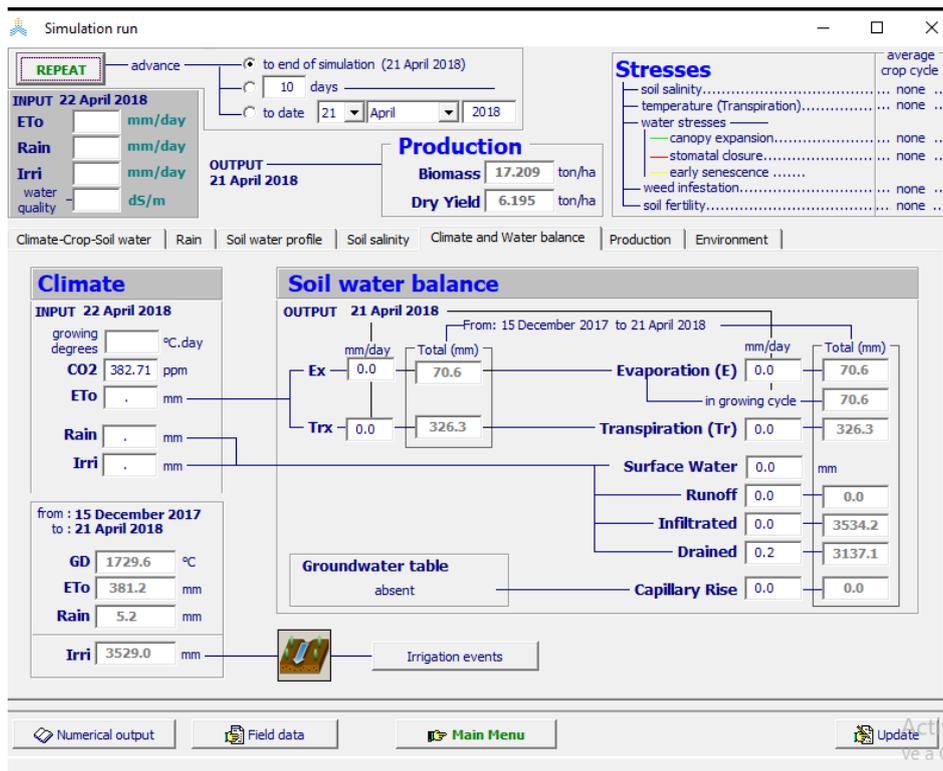
ANEXO 8: Simulación del balance hídrico del modelo Aquacrop para tension de humedad del suelo, 0, 0.15 y 0.30 bares

a. 0.0 bares (T0)



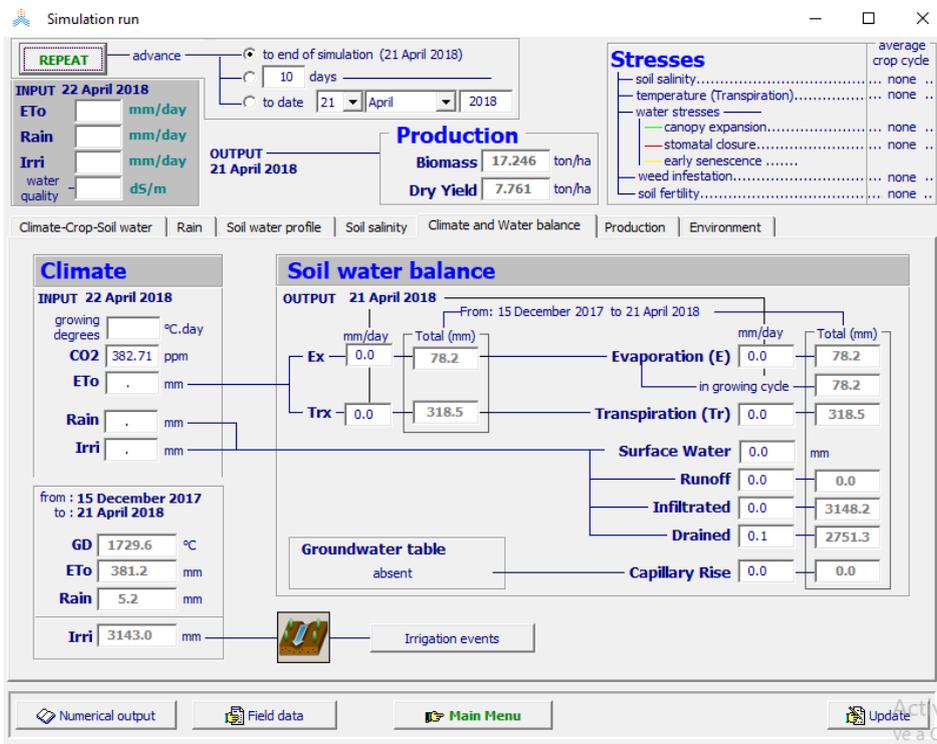
Fuente: Elaborado por software Aquacrop

b. 0.15 bares (T1)



Fuente: Elaborado por software Aquacrop

c. 0.30 bares (T2)



Fuente: Elaborado por software Aquacrop

ANEXO 9: Panel fotográfico

a. preparación de terreno



i. Creación de muros de contención



ii. Realización de fango

b. Almacigo.



i. Germinación



ii. Desarrollo de plántulas



iii. Crecimiento de plántulas



iv. Plántulas listas para llevar a campo

c. Trasplante



i. Plántulas para trasplante



ii. Trasplante

d. Desarrollo del cultivo



a) Vista de tratamientos del experimento

e. Evaluación de la cobertura del dosel

