

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**“IDENTIFICACIÓN DE LÍNEAS DE ARROZ (*Oryza sativa* L.)
ADAPTADAS A DÉFICIT HÍDRICO EN FASE VEGETATIVA
EN EL VALLE CHANCAY – LAMBAYEQUE”**

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

GERLY MARIANNE GARRIDO CHUQUIPIONDO

LIMA – PERÚ

2024

TESIS GERLY GARRIDO CH

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS



Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 3%

Excluir bibliografía

Activo

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**“IDENTIFICACIÓN DE LÍNEAS DE ARROZ (*Oryza sativa* L.)
ADAPTADAS A DÉFICIT HÍDRICO EN FASE VEGETATIVA
EN EL VALLE CHANCAY – LAMBAYEQUE”**

GERLY MARIANNE GARRIDO CHUQUIPIONDO

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:
INGENIERA AGRÓNOMA**

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

.....
Dr. Raúl Humberto Blas Sevillano

PRESIDENTE

.....
Ph. D. Elizabeth Consuelo Heros Aguilar

ASESOR

.....
Dra. Ruby Antonieta Vega Ravello

MIEMBRO

.....
Ph. D. Elías Hugo Huanuqueño Coca

MIEMBRO

Lima – Perú

2024

DEDICATORIA

A papito Dios, por demostrarme que siempre está conmigo y las personas que más amo.

A mi papá, el primer amor de mi vida, por depositar su confianza en mí y apoyarme en todos mis pasos.

A mi mamá, con todo el amor del mundo, por ser el motor de mi vida y por enseñarme a ser una guerrera que puede lograr todo lo que una se propone desde el cariño y la fe.

A mi querida hermana Evelyn, por ser mi mejor amiga, mi confidente y la que me apoya incondicionalmente en todo.

A Juliancito, por traer alegría a la casa y amarte como una segunda mamá.

A Jesús, gracias por la paciencia y el gran amor que demuestras, por un largo camino juntos, siendo mi soporte e inspiración a lograr mis metas.

A mis papitos Beto, Chelita y Leandro que me guían desde el cielo; a mi mamita Juliana por muchos años más de vida.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Agraria La Molina, mi alma mater, por darme grandes conocimientos y momentos memorables durante mis años de estudio.

A mi asesora de tesis, Ph D. Elizabeth Heros, por su gran dedicación, paciencia, cariño y motivación al brindarme sus grandes conocimientos para lograr culminar esta tesis.

Al Ing. José Hernández, ex líder del programa de Arroz - INIA, por su calidez, indicaciones, consejos y oportunas correcciones para lograr este trabajo de investigación.

A la Ing. Rossana Porras, por su motivación, confianza y enseñanza del uso de equipos de medición de humedad que permitieron el desarrollo de esta tesis.

A Thays y Kevin por los gratos momentos compartidos en el desarrollo de nuestros trabajos de investigación en Chiclayo.

A Rodrigo, mi mejor amigo y a todos mis grandes amigos que me acompañaron en mi etapa universitaria, tienen un lugar especial en mi corazón.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1.	TAXONOMÍA	3
2.2.	ASPECTOS GENERALES DE LA BOTÁNICA DEL ARROZ.....	3
2.2.1.	Morfología	3
2.2.2.	Órganos vegetativos	4
2.2.3.	Órganos reproductivos.....	4
2.3.	MÉTODOS DE RIEGO MÁS USADOS EN EL CULTIVO DE ARROZ.....	5
2.3.1.	Riego por inundación.....	5
2.3.2.	Riego por secano	6
2.4.	TECNOLOGÍAS ACTUALES DE MANEJO DE AGUA.....	6
2.4.1.	Producción de arroz en el sistema aeróbico.....	6
2.4.2.	Técnica de humedecimiento y secado (Alternate Wetting Drying System, AWD)	7
2.4.3.	Manejo del arroz en suelo saturado	7
2.5.	MEDICIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL SUELO	8
2.5.1.	Time-Domain Reflectometry (TDR)	8
2.5.2.	Sensores Watermark	8
2.6.	CAMBIO CLIMÁTICO	8
2.6.1.	¿Qué es el cambio climático?	8
2.7.	EFFECTO DEL DÉFICIT HÍDRICO EN LAS CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS DEL ARROZ	9
III.	METODOLOGÍA	11
3.1.	LOCALIZACIÓN	11
3.2.	CARACTERÍSTICAS DEL SUELO	12
3.3.	DATOS CLIMÁTICOS	12
3.4.	MATERIALES Y EQUIPOS.....	13
3.4.1.	Material genético	13
3.4.2.	Materiales y equipos	14
3.5.	DESCRIPCIÓN DEL CAMPO EXPERIMENTAL	14
3.5.1.	Tratamientos	14
3.5.2.	Características y distribución del área experimental	15

3.5.3. Modelo estadístico	15
3.5.4. Croquis del área experimental	16
3.6. MANEJO AGRONÓMICO	17
3.6.1. Preparación del Terreno.....	17
3.6.2. Delimitación de parcelas	17
3.6.3. Siembra de genotipos.....	17
3.6.4. Control de malezas	17
3.6.5. Control de plagas	17
3.6.6. Fertilización	18
3.6.7. Riego.....	18
3.6.8. Cosecha.....	18
3.6.9. Venteo.....	19
3.7. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	19
3.7.1. Rendimiento.....	19
3.7.2. Humedad gravimétrica	19
3.7.3. Calibración de sensores de resistencia en la medición de potencial hídrico – Watermark	20
3.7.4. Variables relacionadas al rendimiento.....	21
3.7.5. Componentes del rendimiento	23
3.7.6. Variables agronómicas	23
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
4.1. RENDIMIENTO (t. ha ⁻¹)	24
4.2. HUMEDAD GRAVIMÉTRICA DEL SUELO (%)	29
4.2.1. Medición de humedad gravimétrica con el equipo TDR (Reflectometría de dominio temporal)	29
4.2.2. Medición del potencial hídrico del suelo con losSensores de humedad Watermark	31
4.2.3. Monitoreo de la napa freática	32
4.3. VARIABLES RELACIONADAS AL RENDIMIENTO	33
4.3.1. Acumulación de biomasa.....	33
4.3.2. Índice de cosecha.....	37
4.4. COMPONENTES DEL RENDIMIENTO	37
4.4.1. Número de panículas por metro cuadrado	37
4.4.2. Número de granos llenos por panícula	39

4.4.3. Peso de 1000 granos	40
4.5. VARIABLES AGRONÓMICAS.....	41
4.5.1. Número de macollos por metro cuadrado.....	41
4.5.2. Altura de planta	42
4.5.3. Periodo de Maduración (días).....	44
4.6. CORRELACIÓN ENTRE LOS DIFERENTES ÍNDICES DE TOLERANCIA AL ESTRÉS Y RENDIMIENTO PROMEDIO DE GENOTIPOS DE ARROZ EN CONDICIONES DE SUELO INUNDADO Y SUELO EN DÉFICIT HÍDRICO EN FASE VEGETATIVA.....	47
4.7. ANÁLISIS CLUSTER DE LOS GENOTIPOS EN CONDICIONES DE SUELO INUNDADO Y SUELO EN DÉFICIT HÍDRICO EN FASE VEGETATIVA	50
4.8. ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL DE LOS GENOTIPOS CON ADAPTACIÓN A SUELO INUNDADO Y SUELO EN DÉFICIT HÍDRICO EN FASE VEGETATIVA	51
4.9. CALIDAD MOLINERA.....	53
V. CONCLUSIONES	56
VI. RECOMENDACIONES	57
VII. BIBLIOGRAFÍA	58
VIII. ANEXOS	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación taxonómica del arroz	3
Tabla 2: Datos climáticos del mes de Diciembre (2019) a Mayo (2020). Estación Experimental Agraria Vista Florida	12
Tabla 3: Relación y codificación de entradas	13
Tabla 4: Materiales y equipos.....	14
Tabla 5: Tratamientos evaluados en la fase experimental	14
Tabla 6: Delimitación de las áreas experimentales	15
Tabla 7: Índices de selección utilizados para identificar los genotipos tolerantes a déficit hídrico.....	22
Tabla 8: Rendimiento en grano ($t. ha^{-1}$) en los sistemas de manejo de agua.....	24
Tabla 9: Prueba de comparación de medias Tukey para la variable rendimiento ($t. ha^{-1}$) en inundación.....	25
Tabla 10: Prueba de comparación de medias Tukey para la variable rendimiento ($t. ha^{-1}$) en suelo en déficit hídrico en fase vegetativa	27
Tabla 11: Humedad gravimétrica (%) en las tres repeticiones del tratamiento T2 en cuatro determinaciones	29
Tabla 12: Medición del potencial hídrico con el equipo Watermark (kPa) en las tres repeticiones del tratamiento T2 en cuatro momentos	31
Tabla 13: Medición de la napa freática a 100 cm por debajo de la superficie del suelo en el tratamiento de déficit hídrico en etapa vegetativa	32
Tabla 14: Acumulación de biomasa ($t. ha^{-1}$) en maduración, en condiciones de inundación y déficit hídrico.....	34
Tabla 15: Prueba de comparación de medias Tukey para la medición de biomasa en maduración ($t. ha^{-1}$) bajo suelo inundado	34
Tabla 16: Prueba de comparación de medias Tukey para la medición de biomasa en maduración ($t. ha^{-1}$) bajo suelo en déficit hídrico en fase vegetativa	35
Tabla 17: Índice de cosecha (%) en los dos sistemas de manejo de agua	37
Tabla 18: Número de panículas por metro cuadrado bajo dos sistemas de manejo de agua.....	37
Tabla 19: Prueba de comparación de medias Tukey para la variable número de panículas por metro cuadrado de genotipos en suelo inundado	38

Tabla 20: Prueba de comparación de medias Tukey para la medición número de panículas por metro cuadrado para suelo con déficit hídrico en fase vegetativa	39
Tabla 21: Número de granos llenos por panícula bajo dos sistemas de manejo de agua	40
Tabla 22: Peso de 1000 granos (g) bajo dos sistemas de manejo de agua.	40
Tabla 23: Número de macollos por metro cuadrado evaluado en cuatro fechas en fase vegetativa.....	41
Tabla 24: Altura de planta (cm) evaluado en 9 fechas a lo largo de las tres etapas fenológicas de crecimiento	43
Tabla 25: Periodo de Maduración (días) en dos sistemas de manejo de agua.....	44
Tabla 26: Prueba de comparación de medias Tukey para el periodo de maduración (Días) en el tratamiento de inundación.....	45
Tabla 27: Prueba de comparación de medias Tukey para el periodo de maduración (Días) en el tratamiento de déficit hídrico en fase vegetativa	46
Tabla 28: Porcentaje de granos enteros (%) en dos sistemas de manejo de agua	53
Tabla 29: Prueba de Tukey para rendimiento de molinería en manejo de riego inundado	53
Tabla 30: Prueba de Tukey para rendimiento de molinería en condiciones de déficit hídrico en fase vegetativa	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Imagen satelital de la ubicación de las áreas de investigación	11
Figura 2: Variación mensual de la temperatura. Promedio de temperatura máxima y mínima.....	13
Figura 3: Croquis del experimento bajo inundación	16
Figura 4: Croquis del experimento bajo déficit hídrico en fase vegetativa.....	16
Figura 5: Curva de calibración del TDR con la humedad gravimétrica de campo	20
Figura 6: Curva de calibración de los sensores Watermark con la humedad gravimétrica de campo.....	21
Figura 7: Rendimiento (T. ha ⁻¹) de los genotipos cultivados en suelo inundado	26
Figura 8: Rendimiento (t. ha ⁻¹) de los genotipos cultivados en suelo con déficit hídrico ..	28
Figura 9: Humedad gravimétrica (%) en las tres repeticiones del tratamiento de suelo en déficit hídrico en fase vegetativa T2.....	30
Figura 10: Mediciones de la profundidad de la napa freática (cm) en el tratamiento T2 de manejo del suelo en déficit hídrico en fase vegetativa	33
Figura 11: Número de macollos por metro cuadrado medido en cuatro ocasiones luego del riego de germinación	42
Figura 12: Altura de planta (cm) evaluada por fases fenológicas	44
Figura 13: Correlación del Rendimiento (t ha ⁻¹) vs periodos de maduración fisiológica (Días) en dos ambientes.....	46
Figura 14: R1= Rendimiento de un genotipo en suelo inundado, R2= Rendimiento de un genotipo en suelo bajo déficit hídrico en fase vegetativa, ISE= Índice de susceptibilidad al estrés, PMG= Productividad media geométrica, PM= Productividad media, IT= Índice de tolerancia, ITE= Índice de tolerancia al estrés, IR= Índice de rendimiento, MH= Media armónica, IER= Índice de estabilidad de rendimiento	48
Figura 15: Análisis de componentes principales entre rendimiento en suelo inundado y bajo déficit hídrico en fase vegetativa e índices de selección	49
Figura 16: Dendograma de análisis cluster de genotipos basados en índices de selección y rendimiento de grano bajo suelo inundado y suelo en déficit hídrico en fase vegetativa.....	50
Figura 17: Gráficos tridimensionales de rendimientos de genotipos manejados en condiciones de suelo inundado (R1) y suelo en déficit hídrico en fase vegetativa (R2) con los índices de selección: Productividad media geométrica (PMG), Productividad media (PM), Media armónica (MH) e Índice de tolerancia al estrés (ITE).....	52

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Análisis físico – químico del suelo	62
Anexo 2: ANOVA para la variable rendimiento ($t. ha^{-1}$)	63
Anexo 3: ANOVA para la variable acumulación de biomasa ($t. ha^{-1}$)	64
Anexo 4: ANOVA para la variable índice de cosecha (%)	65
Anexo 5: ANOVA para la variable número de panículas por metro cuadrado	66
Anexo 6: ANOVA para la variable número de granos llenos por panícula	67
Anexo 7: ANOVA para la variable peso de 1000 granos (g)	68
Anexo 8: ANOVA para la variable número de macollos por metro cuadrado	69
Anexo 9: ANOVA para la variable altura de planta (cm)	70
Anexo 10: ANOVA para periodos de maduración (Días)	71
Anexo 11: ANOVA para calidad molinera (%)	72
Anexo 12. Proyecto FONTAGRO – Más arroz con menos emisiones y con menor consumo de agua	73
Anexo 13: Medición de humedad gravimétrica del suelo y de la napa freática	73
Anexo 14: Medición de altura de planta y conteo de macollos	74
Anexo 15: Medición de humedad gravimétrica del suelo con sensores Watermark	74
Anexo 16: Medición de humedad gravimétrica del suelo con TDR	75
Anexo 17: Área experimental de inundación y de déficit hídrico en fase vegetativa	76

LISTA DE ABREVIATURAS

Acrónimo

AWD	:	Alternate Wetting and Drying.
DDS	:	Días después de la siembra.
DDRG	:	Días después del riego de germinación.
EH	:	Estrés hídrico.
IER	:	Índice de estabilidad de rendimiento.
IR	:	Índice de rendimiento.
IRRI	:	International Rice Research Institute.
ISE	:	Índice de susceptibilidad al estrés.
IT	:	Índice de tolerancia.
ITS	:	Índice de tolerancia al estrés.
kPa	:	Kilopascal.
MH	:	Media armónica.
PCA	:	Análisis de componentes principales.
PM	:	Productividad media.
PMG	:	Productividad media geométrica.
TDR	:	Time -Domain Reflectometry.

RESUMEN

El arroz, es uno de los alimentos más importantes para la canasta básica de los peruanos. Su producción demanda grandes cantidades de agua para obtener óptimos rendimientos. Por ese motivo, uno de los grandes desafíos de la producción de arroz, es ahorrar agua sin disminuir los rendimientos del cultivo. La alternativa presentada en este estudio, es identificar genotipos adaptados a condiciones de déficit hídrico que permitan un buen desarrollo al ser manejados con periodos de sequía con la técnica de riego "Alternate Wetting and Drying" (AWD). Esta investigación, se realizó en la Estación Experimental Vista Florida del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) de Lambayeque en la campaña agrícola 2019 - 2020. Se evaluaron dos tratamientos de manejo de riego: (1) Sistema de inundación permanente, (2) AWD con un periodo de déficit hídrico de 15 días en fase vegetativa y riego inundado el resto de las fases fenológicas en 17 genotipos. El objetivo principal, fue identificar a los genotipos con mayor adaptación a las condiciones de inundación y déficit hídrico, y analizar la influencia que tuvieron los dos ambientes sobre el rendimiento de grano y las características relacionadas al rendimiento. Como resultado se obtuvo, que el sistema de inundación permanente tuvo el rendimiento más alto (8.29 t. ha⁻¹) a comparación del rendimiento alcanzado en déficit hídrico (5.64 t. ha⁻¹). Los índices de selección de productividad media geométrica, productividad media, media armónica e índice de tolerancia al estrés, identificaron a los genotipos TP 30758 y TP 30598 como los más adaptados en los dos ambientes.

Palabras clave: Arroz, AWD, déficit hídrico, genotipos, ahorro de agua.

ABSTRACT

Rice is one of the most important foods for the basic basket of Peruvians. Its production demands large quantities of water to obtain optimal yields. For this reason, one of the great challenges of rice production is to save water without reducing crop yields. The alternative presented in this study is to identify genotypes adapted to water stress conditions that allow good development when managed with periods of drought with the "Alternate Wetting and Drying" (AWD) irrigation technique. This research was carried out at the Vista Florida Experimental Station of the National Institute of Agrarian Innovation (INIA) of Lambayeque in the 2019 - 2020 agricultural campaign. Two irrigation management treatments were evaluated: (1) Permanent flooding system, (2) AWD with a period of water stress of 15 days in the vegetative phase and flooded irrigation for the rest of the phenological phases in 17 genotypes. The main objective was to identify the genotypes with greater adaptation to flooding and water stress conditions, and analyze the influence that both environments had on grain yield and characteristics related to yield. As a result, it was obtained that the permanent flooding system had the highest yield (8.29 t. ha⁻¹) compared to the yield achieved in water stress (5.64 t. ha⁻¹). The selection indices of geometric mean productivity, mean productivity, harmonic mean and stress tolerance index identify the TP 30758 and TP 30598 genotypes as the most adapted in both environments.

Keywords: Rice, AWD, water stress, genotypes, water saving.

I. INTRODUCCIÓN

En el Perú el arroz es un cultivo de gran importancia que cubre 400 mil hectáreas en promedio por campaña agrícola, distribuidas en la región costa y selva, siendo los departamentos San Martín, Piura y Lambayeque las principales zonas productoras de este cereal. La forma de siembra común en el país es mediante trasplante, método que permitió obtener una producción de 3 399 574 toneladas de arroz cáscara en el año 2021. En cuanto al rendimiento por regiones, la mayor productividad se registra en la región de Arequipa, donde se obtuvo un promedio de 14 t ha⁻¹ frente al 7.2 t ha⁻¹ que obtuvo el promedio nacional. En segundo lugar, estuvo Ancash con 12 t ha⁻¹, Lambayeque con 11 t ha⁻¹, y finalmente Tumbes con 8,5 t ha⁻¹ (Sistema Integrado de Estadística Agraria [SIEA], 2022).

El 93% de la producción de arroz se realiza bajo sistema de riego de inundación, seguido de sistema de secano y barriales; sin embargo, el sistema más usado demanda un gran consumo de agua. Se estima que en Costa se necesita entre 12 000 a 15 000 m³ de agua por hectárea y en Selva entre 16 000 a 18 000 m³ de agua por hectárea. Esto origina que los suelos de las zonas productoras de arroz tengan problemas de degradación y salinización como consecuencia del exceso de agua y la falta de drenaje (MINAGRI, 2018).

La forma tradicional de cultivar arroz es considerada como la más ineficiente en el uso del agua de riego. El sistema inundado requiere que se mantenga una lámina estática entre 10 – 15 cm en el campo cultivado durante todo el ciclo fenológico, sin embargo, esto genera grandes pérdidas de agua por percolación, escorrentía y evaporación directa de la lámina libre de agua hacia la atmósfera (Kato *et al.*, 2008). Por la importancia del cultivo y su alta demanda en el país y a nivel mundial, se deben adoptar tecnologías que permitan seguir produciendo arroz, con menor consumo de agua sin afectar la productividad.

Los desafíos actuales de los productores es generar la mayor cantidad de arroz minimizando el consumo del agua, en ese sentido resulta indispensable adoptar nuevas estrategias en el uso racional del agua, sin menguar los rendimientos del cultivo.

Una alternativa importante para solucionar este problema es identificar genotipos tolerantes a periodos de sequía para mejorar la eficiencia de uso del agua acompañados con mejores técnicas de manejo de riego. Los genotipos deberían mantener una óptima producción de biomasa bajo déficit hídrico, que permita obtener buenos rendimientos.

En este estudio se evaluaron 17 genotipos de arroz: once líneas de arroz con tolerancia al déficit hídrico, introducidas del International Rice Research Institute – IRRI por la UNALM, y seis cultivares comerciales para condiciones de inundación. Estos genotipos se evaluaron en condiciones de inundación y de déficit hídrico en la fase vegetativa, para identificar los genotipos más estables en los dos ambientes.

El objetivo general del presente estudio fue:

Evaluar genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.) en condiciones de inundación y déficit hídrico en fase vegetativa, para seleccionar a los de mayor adaptación.

Los objetivos específicos fueron:

- Evaluar la influencia del manejo de inundación y déficit hídrico en las características agronómicas relacionadas al rendimiento en grano.
- Aplicar los índices de selección para identificar los genotipos con mejor performance en condiciones de inundación y de déficit hídrico.
- Determinar la calidad molinera de los genotipos evaluados en condiciones de inundación y déficit hídrico en la fase vegetativa.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. TAXONOMÍA

Strasburger (1986), clasifica el arroz de la siguiente manera:

Tabla 1: Clasificación taxonómica del arroz

División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Superorden	Commelinanae
Orden	Poales
Familia	Poaceae
Subfamilia	Oryzoideae
Género	<i>Oryza</i>
Especie	<i>Oryza sativa</i> L.

2.2. ASPECTOS GENERALES DE LA BOTÁNICA DEL ARROZ

2.2.1. Morfología

El arroz es considerado una gramínea anual, en su morfología presenta tallos redondos huecos los cuales están compuestos por nudos y entrenudos además de hojas de lámina planas que están unidas al tallo por la vaina y una inflorescencia llamada panícula. La altura de la planta va a depender del cultivar y del ambiente en el que se desarrolla. El arroz tiene tres fases de crecimiento: la fase inicial corresponde a la fase vegetativa, las fases medias de formación de los órganos reproductores corresponden a la fase reproductiva y la última fase es la de maduración.

2.2.2. Órganos vegetativos

Los órganos vegetativos están conformados por la raíz, el tallo y las hojas.

a. Raíces

El arroz tiene dos tipos de sistemas radiculares: las raíces embrionarias o seminales, las cuales tienen un corto tiempo de vida después de la germinación y las raíces adventicias o secundarias, las cuales se ramifican en el suelo y nacen de los nudos subterráneos de los tallos jóvenes (Heros, 2012).

b. Tallo

Está conformado por nudos y entrenudos alternados. Los nudos tienen una hoja y una yema que puede diferenciarse para formar un nuevo macollo. Los entrenudos son huecos y su tamaño depende generalmente de su ubicación, los que están ubicados más cerca a la base son más cortos y poco desarrollados, además están apilados entre ellos a diferencia de los entrenudos que se alejan de la base, son menos gruesos y más largos.

Existe macollamientos primarios y secundarios y terciarios, los primeros se desarrollan a partir del tallo principal en forma alterna, los macollos secundarios provienen seguidamente de los primarios y los macollos terciarios son producidos de los secundarios (Heros, 2012).

c. Hojas

Las hojas del arroz son alternas y se forman a lo largo de los nudos del tallo. La primera hoja naciente es llamada prófido, el cual es una hoja incompleta porque no tiene una lámina desarrollada sino una vaina y brácteas aquilladas, a partir de la segunda hoja se denomina hoja completa. Cada hoja completa está constituida por la vaina, lámina, cuello, nervadura central, lígula y aurícula (Heros, 2012).

2.2.3. Órganos reproductivos

Los órganos reproductivos están conformados por la inflorescencia denominada panícula, la cual está ubicada por encima del pedúnculo y por el fruto.

a. La panícula

Está conformada por un conjunto de espiguillas nacidas del nudo superior del tallo (nudo ciliar). La rama primaria de la panícula se subdivide en ramas secundarias y hasta terciarias que cargan los granos de arroz, por ese motivo al inicio de la formación de la panícula se encuentra erecta y mientras se da el llenado de grano, la panícula se va inclinando hasta la maduración por el peso de los granos (Heros, 2012).

b. El fruto

El fruto del arroz es una cariósida, el cual está conformado por el embrión, el endospermo y el complejo pericarpio-testa. Asimismo, la palea, la lemma y la raquilla pertenecen a la cascara del arroz. La longitud, el ancho y espesor del grano varía depende de los cultivares (Heros, 2019).

2.3. MÉTODOS DE RIEGO MÁS USADOS EN EL CULTIVO DE ARROZ

En el Perú en el cultivo de arroz se practica el método de riego por inundación, que es el más utilizado en Costa, Selva Alta, y en pequeñas áreas de Selva Baja en la que predomina la siembra por secano.

2.3.1. Riego por inundación

Este tipo de riego consiste en suministrar agua de tal forma que cubra y forme una lámina estática en el área del cultivo, que debe mantenerse durante gran parte del ciclo de vida del arroz. Este método tiene ciertas ventajas que hace que sea el más usado en el país, ventajas como:

- Evitar que las temperaturas cambien bruscamente y dañen al cultivo.
- Aumentar la eficiencia de los fertilizantes hasta en un 70% porque los nutrientes se vuelvan rápidamente disponibles en el suelo y de esta manera las plantas lo puedan absorber.
- Menor competencia de malezas.
- Aumentar el rendimiento debido a que incrementa la disponibilidad y eficiencia de los fertilizantes.

2.3.2. Riego por seco

En este tipo de riego el agua que se emplea proviene de las precipitaciones ocurridas en los meses de lluvia. En el Perú ocurre desde noviembre hasta abril. La lluvia resulta ser un factor crítico para los agricultores que optan por este tipo de producción, porque el cultivo está expuesto a falta o exceso de agua, además limita la instalación y mantenimiento del cultivo debido a que solo se puede sembrar en épocas de lluvia, y genera menores rendimientos que los cultivos manejados con riego por inundación.

2.4. TECNOLOGÍAS ACTUALES DE MANEJO DE AGUA

El manejo convencional del cultivo de arroz demanda un gran consumo de agua, debido a que las pozas deben permanecer inundadas desde la preparación del suelo, establecimiento de la lámina de agua después del trasplante y durante todo su ciclo fenológico, produciéndose grandes pérdidas de agua por infiltración, percolación y evapotranspiración. Para dar soluciones a esta problemática se han desarrollado alternativas en relación al manejo del agua que nos permita mayor eficiencia de uso del agua.

Las técnicas relevantes que podemos mencionar son: el sistema aeróbico de arroz, la alternancia en el humedecimiento y secado del suelo y el manejo del arroz en suelo saturado (Heros, 2019).

2.4.1. Producción de arroz en el sistema aeróbico

Para producir arroz en este sistema se debe tener en consideración dos factores: El material genético que se va a sembrar y la preparación del terreno donde se desarrollará el cultivo.

Si se quiere alcanzar rendimientos altos en condiciones del sistema aeróbico, se debe disponer de materiales genéticos que sean tolerantes a sequía, desarrollados con parentales adaptados al déficit hídrico del sistema de seco y con rendimientos altos en ambientes inundados (Lafitte *et al.*, 2002).

En cuanto a la preparación del suelo, los cultivares deben ser sembrados en suelos no batidos, con buen drenaje, y bien aireados (Heros, 2019). Con estos dos factores antes mencionados podemos obtener buenos resultados en cuanto a rendimiento del arroz, resultando en una buena alternativa ante la problemática de escasez de agua.

Si hacemos una comparación entre el sistema de inundación continua y el sistema aeróbico, el potencial de ahorro de agua está entre 30 a 50% por disminuir las pérdidas de agua por percolación e infiltración (Bouman y Tuong, 2006).

2.4.2. Técnica de humedecimiento y secado (Alternate Wetting Drying System, AWD)

Esta técnica consiste en alternar las inundaciones con periodos de humedecimiento - secado, es decir, se debe regar hasta inundar las pozas y realizar secas hasta que el suelo tenga un contenido de humedad de ~ 15 kPa por un determinado periodo. Este tiempo de secado va a depender de la textura del suelo y de las condiciones climáticas que se presenten en la zona, antes de aplicar nuevamente agua a las pozas para la siguiente inundación (Bouman y Tuong, 2006; Belder *et al.* 2004).

En un estudio realizado en la región central de Tailandia, en las cuencas de los ríos Chao Phraya y Tha Chin, se comparó el uso de agua para diferentes sistemas de cultivo de arroz, incluidas las técnicas tradicionales como el sistema por inundación y por humedecimiento y secado (AWD). Los resultados del estudio revelaron que el método de trasplante por inundación, requiere mayor uso de agua 1.34 - 1.48 m³ kg⁻¹ de arroz, y en la técnica de humedecimiento y secado el uso de agua estuvo en 0.96 - 1 m³ kg⁻¹. Por lo tanto, se concluyó que el método AWD puede ser una opción para los agricultores de la zona (Silalertruksa *et al.* 2017)

2.4.3. Manejo del arroz en suelo saturado

En esta técnica se debe mantener el suelo saturado, para ello el nivel del agua debe estar en la superficie del suelo o sobre este manteniendo una lámina estática de máximo 1 cm. Si se adopta esta técnica se debe realizar riegos ligeros y frecuentes.

Si mantenemos el suelo en saturación, nos aseguramos de reducir la presión hidrostática, y podemos reducir las pérdidas de agua por infiltración y percolación profunda (Borrel *et al.*, 1997).

Cuando el suelo se encuentra saturado, el potencial hídrico es de 0 Kp, esto porque el agua está retenida en los macroporos y allí las moléculas no están unidas a los sólidos del suelo y

por ello son capaces de desplazarse libremente alrededor de las raíces sin mayor esfuerzo (Heros, 2019).

2.5. MEDICIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL SUELO

2.5.1. Time-Domain Reflectometry (TDR)

El TDR utiliza instrumentos de medición de reflectancia en referencia al tiempo. Este equipo toma como referencia la presencia de agua en el suelo que afecta la velocidad de propagación de una onda electromagnética. El TDR envía una onda electromagnética a través de los sensores que se encuentran en las varillas paralelas que vienen con el equipo, las cuales son colocadas en el suelo a la profundidad deseada. Una vez colocadas en el suelo, la varilla mide el tiempo que le toma a la onda de viajar a través de estas varillas de ida y regreso. El instrumento internamente registra el tiempo y lo convierte en una lectura de la humedad en el suelo, mientras más mojado esté el suelo, más tiempo le toma a la onda magnética viajar entre las varillas (Martin, 2017).

2.5.2. Sensores Watermark

El principio físico que explican el funcionamiento de este instrumento es que el contenido de humedad se puede determinar por la resistencia al paso de la corriente eléctrica entre dos electrodos que están en contacto con el suelo. Entre más agua haya en el suelo, más baja será la resistencia, es por este motivo que los suelos saturados tienen una lectura de 0 Kpa (Martin, 2017).

2.6. CAMBIO CLIMÁTICO

2.6.1. ¿Qué es el cambio climático?

Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático con sus siglas en inglés (IPCC), refiere que el cambio climático se produce debido a la variabilidad natural del clima o como resultados de las actividades realizadas por el hombre. La segunda causa es la más peligrosa y avanza a pasos agigantados (IPCC, 2014).

El mayor daño del cambio climático está relacionado al efecto invernadero, el cual atrapa el calor y recalienta el planeta ya que estos gases de efecto invernadero tienen la capacidad de absorber la radiación producida por la tierra (que pretende eliminarse) para devolverlos nuevamente a la superficie del planeta produciendo que este se caliente más y más, trayendo consigo serios problemas que ya estamos viviendo, tales como: olas de calor, sequías, inundaciones, tormentas, climas atípicos, fenómenos del niño/a y demás eventos extremos. Las consecuencias se están presentando en todo el mundo, siendo los países en desarrollo los que están sintiendo más el impacto que genera los daños del cambio climático. Por ello la importancia de tomar en cuenta esta problemática y contribuir sustancialmente a los cambios para evitar agravar el problema.

2.7. EFECTO DEL DÉFICIT HÍDRICO EN LAS CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS DEL ARROZ

El arroz (*Oryza sativa* L.) es considerado un cultivo básico en todo el mundo, y para su producción requiere grandes cantidades de agua. El déficit hídrico representa una de las limitaciones más importantes para su crecimiento y rendimiento de grano.

La sequía afecta al arroz a niveles morfológicos, fisiológicos y moleculares. Se dan problemas como la floración tardía, la reducción de acumulación de biomasa y repartición de materia seca, disminución de la capacidad fotosintética producto del cierre estomático, las limitaciones metabólicas y el daño oxidativo a los cloroplastos (Farooq *et al.*, 2009).

Las plantas de arroz de baja estatura con área foliar reducida y precoces son más capaces de tolerar el déficit por sequía. Se da una mayor absorción de agua debido al desarrollo de sistemas de raíces más grandes y profundas, además de la acumulación de osmolitos y osmoprotectores como mecanismos importantes para la resistencia a la sequía (Farooq *et al.*, 2009).

El crecimiento de las plantas es un proceso que implica el incremento celular en tamaño (alargamiento celular) y en número (división celular). La disminución del crecimiento puede ser interpretado como una inhibición en el alargamiento celular, debido a la deficiencia hídrica de la planta produciendo la reducción de la turgencia de las células (Muthurajan y Zahra-Sadat, 2011).

El incremento del número de macollos de las plantas en sistema no inundado puede darse por la oxigenación del suelo y la incidencia de las temperaturas en la superficie del suelo. Éstos factores generan una mayor fertilidad de los macollos secundarios y terciarios, los cuales logran terminar su ciclo de vida conjuntamente con la planta madre (Polón y Castro, 1999).

Asimismo, García y Rodes (2009), afirman que la suspensión del riego en la fase vegetativa, reduce el número de tallos por planta, así como la reducción de la biomasa y materia seca. Sin embargo, afirman que el rendimiento en grano se equilibra debido al mayor número de granos llenos por panícula. El déficit hídrico promueve la movilización de los fotoasimilados de reserva acumulados en las vainas de la hoja bandera y los tres entrenudos superiores del tallo principal generando la principal fuente suministradora para el llenado de los granos.

Durante la etapa de macollamiento, la sequía causa una disminución en la altura de las plantas y tamaño de las hojas, además de marchitamiento y secado de estas, así como un alargamiento de la fase vegetativa. Una deficiencia de agua en la etapa vegetativa causa una reducción del número de tallos.

En cuanto a la acumulación de biomasa, las plantas que son expuestas al déficit hídrico en la fase vegetativa muestran menor acumulación de biomasa que las plantas producidas en sistema de inundación. Sin embargo, en cuanto al comportamiento de la raíz, las plantas que son sometidas a periodos de déficit hídrico, muestran un incremento en el sistema radicular (Gonzales, 2016).

III. METODOLOGÍA

3.1. LOCALIZACIÓN

El experimento se desarrolló en la Estación Experimental Agraria Vista Florida del INIA, ubicado en la región Lambayeque, provincia de Chiclayo, Distrito Picsi, Valle Chancay, con coordenadas $06^{\circ}43'34''$ S $79^{\circ}46'49''$ W y altitud 30 m.s.n.m (Figura 1).



Figura 1: Imagen satelital de la ubicación de las áreas de investigación

Nota. Los círculos marcados corresponden a los 2 tratamientos estudiados.

3.2. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

El análisis físico – químico del suelo se realizaron en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes (LASPAF) de la UNALM. Las muestras fueron colectadas de las áreas experimentales a 30 cm de profundidad (Anexo 1).

El trabajo de investigación se desarrolló en un suelo de textura franco arcilloso. Según el análisis de suelo se tuvo una composición de 28% arena, 36% limo y 36% arcilla. El pH del suelo es moderadamente alcalino (7.96). El contenido de materia orgánica es bajo (1.10%).

La conductividad eléctrica (C.E.) fue de 0.62 dS m⁻¹, valor bajo en sales para el cultivo porque el arroz tolera valores de salinidad hasta 3 dS m⁻¹, valores superiores determinan problemas de sales. La disponibilidad de fósforo y potasio es alta 16 ppm y 441 ppm, respectivamente.

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) el suelo estudiado es de (27.52 meq.100 g suelo⁻¹). Asimismo, se determinó las características hidráulicas del suelo. La capacidad de campo fue de 29.80% y el punto de marchitez 16.95%.

3.3. DATOS CLIMÁTICOS

Los datos climáticos fueron registrados por la Estación Meteorológica – INIA – Estación Experimental Vista Florida (Tabla 2) corresponden a la campaña 2019 – 2020, entre los meses de diciembre del 2019 a mayo del 2020 (Figura 2).

Tabla 2: Datos climáticos del mes de Diciembre (2019) a Mayo (2020). Estación Experimental Agraria Vista Florida

Mes	Temperatura (°C)			Radiación solar (cal.cm ⁻²)	Precipitación (mm)
	Promedio	Máxima	Mínima		
Diciembre	23.14	31.70	17.0	501	3.9
Enero	24.9	34.1	18.7	540	0.0
Febrero	25.3	31.2	20.1	596	0.0
Marzo	26.2	33.5	19.3	524	1.6
Abril	23.5	32.4	18.4	507	4.2
Mayo	19.7	27.1	14.1	484	0.0

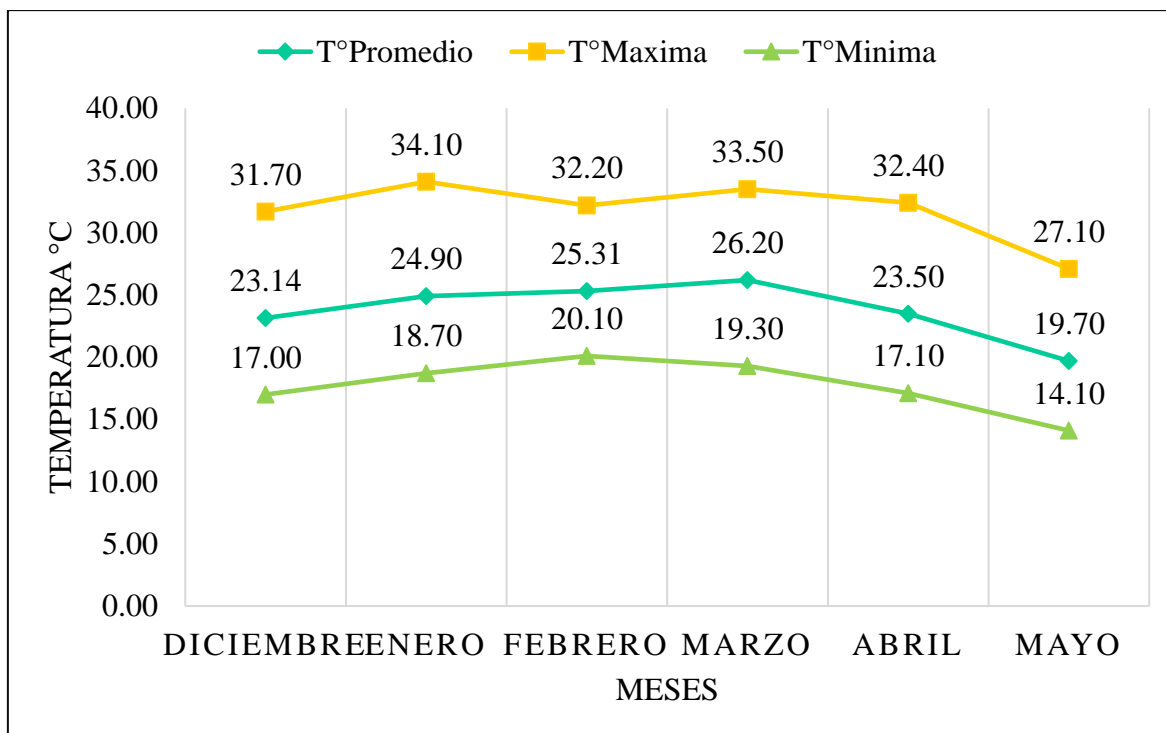


Figura 2: Variación mensual de la temperatura. Promedio de temperatura máxima y mínima

3.4. MATERIALES Y EQUIPOS

3.4.1. Material genético

Se estudiaron 11 genotipos desarrollados por el Instituto Internacional de Investigación en Arroz (“International Rice Research Institute” IRRI) y 6 cultivares comerciales (Tabla 3).

Tabla 3: Relación y codificación de entradas

N° Entrada 2020	Código IIRON. 2018 IRRI
1	TP 2677
2*	Tinajones
3*	IR-43
4*	La Puntilla
5	TP 30602
6*	Fortaleza
7*	La Esperanza
8	TP 30755
9	TP 24172
10	TP 26717
11	TP 30757
12	TP 30758
13	TP 30598

«Continuación»

14	Vandana
15	IR-71706
16	Sahood Ulan 1
17*	Mallares

*Cultivares comerciales.

3.4.2. Materiales y equipos

Tabla 4: Materiales y equipos

Material de campo	Maquinaria, implementos, equipos y herramientas de campo	Equipos e implementos para medir la humedad del suelo – déficit Hídrico
Wincha	Tractor	
Bolsas de plástico	Arado	TDR
Bolsas de papel	Rufa	Estufas
Cordeles	Nivelador láser	Cilindro para muestras de suelo
Estacas de madera	Rastra de 12 pulgadas	Barreno
Libreta de campo	Mochila de fumigación	Balanza
Etiquetas	Palas	Porómetro
Sacos de polipropileno	Hoces	
Mantas de polipropileno		

3.5. DESCRIPCIÓN DEL CAMPO EXPERIMENTAL

Para el estudio se usaron 2 pozas que tuvieron una dimensión de 279.11 m² para el tratamiento de inundación y de 271.4 m² para el tratamiento de déficit hídrico en fase vegetativa. Ambos tratamientos tuvieron 3 repeticiones

3.5.1. Tratamientos

Tabla 5: Tratamientos evaluados en la fase experimental

Tratamientos	
T1- (IP)	Inundación permanente
T2 (DH)	Déficit hídrico en fase vegetativa (15 días) + Inundación en las demás fases de crecimiento.

3.5.2. Características y distribución del área experimental

En la Tabla 6, se indican las características de las áreas experimentales:

Tabla 6: Delimitación de las áreas experimentales

	Diseño	Bloques completos al azar
1.	Áreas experimentales (Sistemas de riego).	2
2.	Tratamientos por experimento.	17
3.	Repeticiones por experimento.	3
4.	Largo de hileras	4 m
5.	Distanciamiento entre hileras	0.25 m
6.	Área de experimento de déficit hídrico 23.6 x 11.5	271.4 m ²
7.	Número de hileras por tratamiento	3
5.	Área de experimento bajo inundación 24.7 x 11.30	279.11 m ²
6.	Área total del estudio	550.51 m ²

3.5.3. Modelo estadístico

El modelo lineal que define a un diseño de bloques completos al azar se define como:

$$Y_{ijk} = u + T_i + B_j + E_{ij}$$

Donde:

i: 1,2,3 t (Accesiones o genotipos). j: 1,2,3 t (Bloques o repeticiones).

Y_{ij}: Observación del i-ésimo tratamiento en el

j-ésimo bloque. u: Media general.

T_i: efecto del genotipo de la i-

ésima accesión B_j: efecto de j-

ésimo bloque.

E_{ijk} = efecto aleatorio del error experimental asociado a Y_{ij}.

Todas las variables fueron analizadas por la prueba ANOVA y la prueba de comparación de Tukey con un nivel de significancia del 5% para comparar los dos tratamientos y los diecisiete genotipos usados en el experimento. El software utilizado para el análisis estadístico fue RStudio.

3.5.4. Croquis del área experimental

En las figuras 3 y 4 se muestran la distribución de los 17 genotipos en cada repetición de cada área experimental.

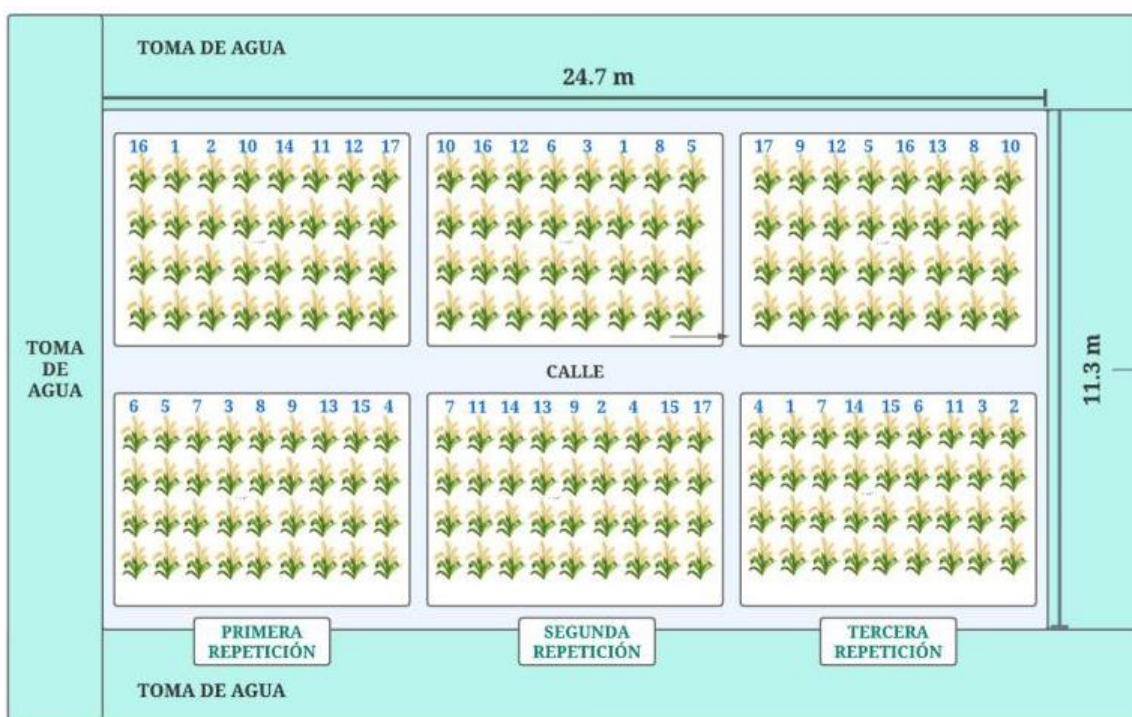


Figura 3: Croquis del experimento bajo inundación

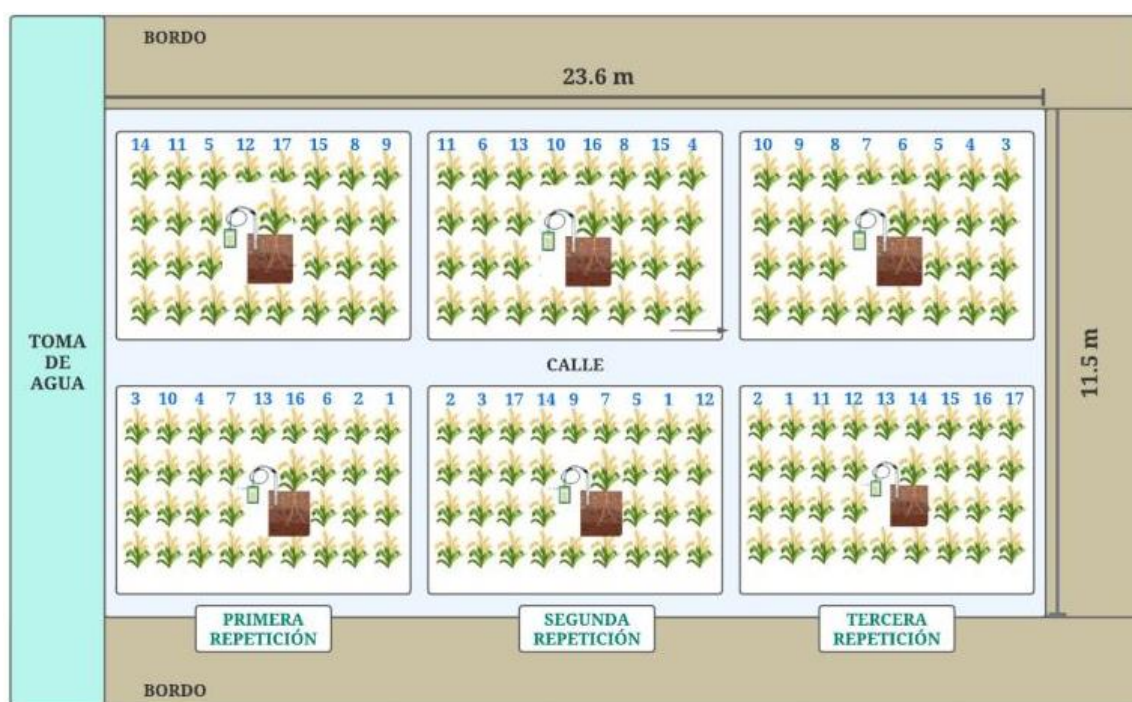


Figura 4: Croquis del experimento bajo déficit hídrico en fase vegetativa

3.6. MANEJO AGRONÓMICO

3.6.1. Preparación del Terreno

Se inició la preparación del terreno el 6 de enero del 2020. Las primeras labores fueron: la aradura del suelo, remojo pesado para la germinación de semillas de malezas, pases de rastra cruzada, nivelación láser y bordeadura.

3.6.2. Delimitación de parcelas

Para delimitar las parcelas primero se realizó el levantamiento de bordos con ayuda de un bordeador y luego se rectificó de manera manual, posteriormente se realizó la medición de las pozas y se colocaron estacas para delimitar el terreno de siembra de cada genotipo. Finalmente, en cada estaca se colocaron etiquetas enumeradas para identificar a los genotipos.

3.6.3. Siembra de genotipos

Se realizó siembra directa, para ello, se colocaron 6 gramos de semilla certificada por metro cuadrado, de cada genotipo en una parcela de tres hileras de 4 m. de largo con separación de 0.25 m. entre hileras. Esta labor fue realizada del 12 al 14 de enero. El riego primer riego de germinación se realizó el 15 de enero.

3.6.4. Control de malezas

Se efectuó a los cuatro días después del riego de germinación, con la aplicación del herbicida pre-emergente Bentiocarbo (Saturno 5%), la dosis de cinco gramos por m².

3.6.5. Control de plagas

Se ejecutó el primer control de plagas importantes con el insecticida Dantotsu a los cuatro días después del riego de germinación para los gusanos de tierra *Spodoptera frugiperda* y *Agrotis sp.* El 5 de febrero se realizó la aplicación del mismo insecticida para el control de los insectos picadores chupadores como *Tagosodes oryzicolus* y para mosca minadora *Hydrellia wirthi*.

3.6.6. Fertilización

Para la fertilización nitrogenada, se usó urea en dos momentos, la primera aplicación fue a los 25 días después de la siembra a una dosis de 120 kg de nitrógeno por hectárea y la segunda aplicación de 120 kg N ha⁻¹ al inicio de la fase reproductiva. Asimismo, en la primera fertilización, se aplicó 60 kg ha⁻¹ de potasio en forma de cloruro de potasio y 60 kg ha⁻¹ de fósforo en forma de sulfato triple de calcio (46% de P₂O₅).

3.6.7. Riego

Para cada tratamiento los primeros 32 días se manejó con riegos frecuentes y ligeros para realizar las labores agronómicas antes mencionadas.

Posteriormente el riego de cada tratamiento se manejó de la siguiente manera:

a. Inundación Permanente

En el tratamiento se mantuvo bajo inundación continua, con una lámina de 5 – 10 cm. durante todas las fases fenológicas.

b. Déficit hídrico en fase vegetativa + Riego Inundado el resto de las fases de crecimiento.

Luego del riego de la primera fertilización se esperó que el agua se evapore, infiltre y percole en el suelo. En el día 33 después de la siembra, con el suelo completamente saturado (sin lámina de agua presente) se dio inicio al periodo de déficit hídrico, el cual duró 15 días. Posteriormente, se mantuvo un riego bajo inundación continua hasta la maduración fisiológica.

3.6.8. Cosecha

La cosecha se realizó de forma manual en el área neta por parcela 0.75 m². Para ello, con ayuda de hoces, se realizó el corte en la base del tallo de cada genotipo y se dejó secar para mantener una humedad de grano del 14%.

3.6.9. Venteo

Posteriormente al azote de panículas (para obtener los granos de arroz) se realizó el venteo con ayuda de una venteadora, la cual nos ayudó a eliminar los fragmentos de paja que quedaron con los granos.

3.7. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.7.1. Rendimiento

Se cosechó un área neta de 0.75 m², que corresponde a 3 m de la hilera central de cada parcela. Luego del secado y venteado de grano se ajustó el rendimiento a humedad de 14% y se expresó en t. ha⁻¹.

3.7.2. Humedad gravimétrica

Se efectuaron los muestreos de humedad con ayuda del TDR, para ello se calibró correctamente el equipo para relacionar los datos arrojados, con la humedad real del campo. Posteriormente se realizó el análisis de correlación entre los datos obtenidos con el TDR y el método gravimétrico.

Para el método gravimétrico, se tomaron 15 puntos de la poza con el barreno a 0.20 m del suelo y se pesó el suelo húmedo, luego se secó el suelo con un horno desecador a una temperatura de 105 °C durante 24 horas y se volvió a pesar el suelo seco para hallar la humedad gravimétrica con la fórmula:

$$\text{Humedad gravimétrica (\%)} = \frac{\text{Peso de suelo húmedo (g)} - \text{Peso de suelo seco (g)}}{\text{Peso de suelo seco (g)}} \times 100$$

Luego, con el TDR se tomó lecturas de esos mismos 15 puntos y se obtuvo la correlación con un R² de 0.83 mostrada en la Figura 5.

Al iniciar el periodo de déficit hídrico, se hicieron lecturas en las tres repeticiones del tratamiento T2 en cuatro momentos, a los 5, 9, 11 y 14 días después de iniciado el periodo de sequía en la fase vegetativa. Para ello, se tomaron cuatro puntos con tres lecturas a 0.2 m en cada repetición. Estas mediciones se realizaron en el horario de 8 a 10 am.

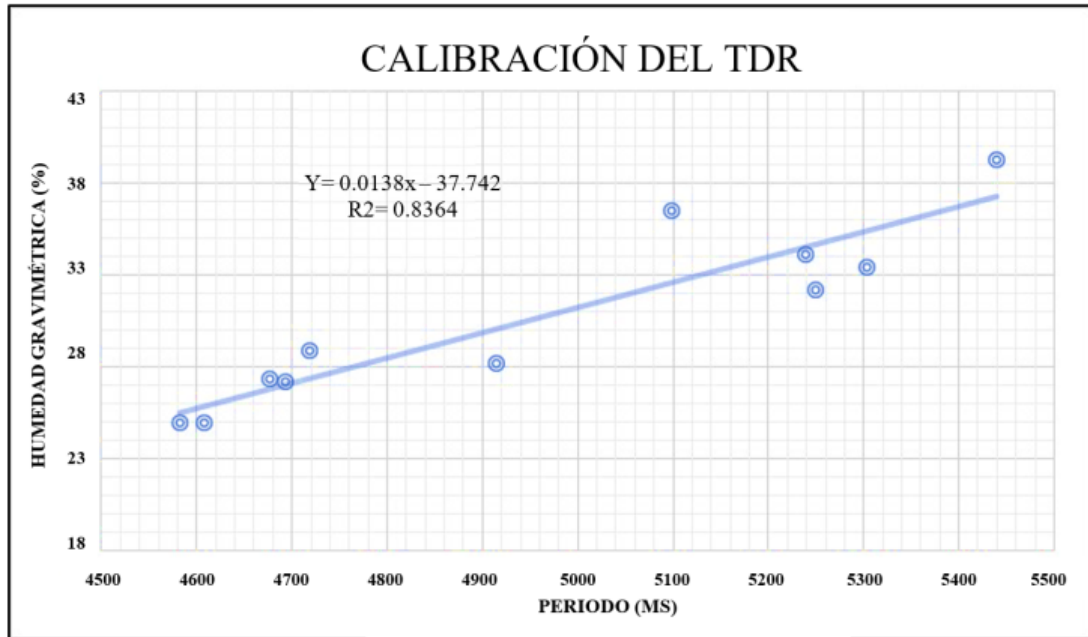


Figura 5: Curva de calibración del TDR con la humedad gravimétrica de campo

3.7.3. Calibración de sensores de resistencia en la medición de potencial hídrico – Watermark

Con la finalidad de calcular el potencial hídrico en la retención de agua del suelo, se efectuaron mediciones con ayuda de los sensores Watermark, para ello previamente se llevó a cabo la calibración correcta del equipo, usando el método gravimétrico para relacionar los datos obtenidos por el sensor con la humedad real del campo.

Para evaluar y calibrar los sensores de resistencia y tensión Watermark se instalaron seis sensores a 0.20 m de profundidad del suelo. Estos sensores fueron saturados en baldes llenos de agua que permitieron el humedecimiento permanente del equipo. Posteriormente, se dejaron reposar los sensores por un periodo de 24 horas para poder instalarlos en el suelo y realizar las lecturas que permitió formar la curva de calibración del equipo, para lo cual, con la ayuda de un barrenador, se perforó el suelo a 0.20 m de profundidad y se colocó los sensores dentro de los agujeros. Seguidamente, se rellenaron los orificios con lodo para que los sensores queden sellados y puedan realizar un monitoreo correcto. Del mismo modo, en los puntos adyacentes donde se ubicaron los sensores watermark, se extrajeron muestras de suelo para hallar la humedad del suelo real del suelo con el método gravimétrico y poder calibrar el equipo mediante curva de calibración de la Figura 6, donde se obtuvo una correlación con un R^2 de 0.71%

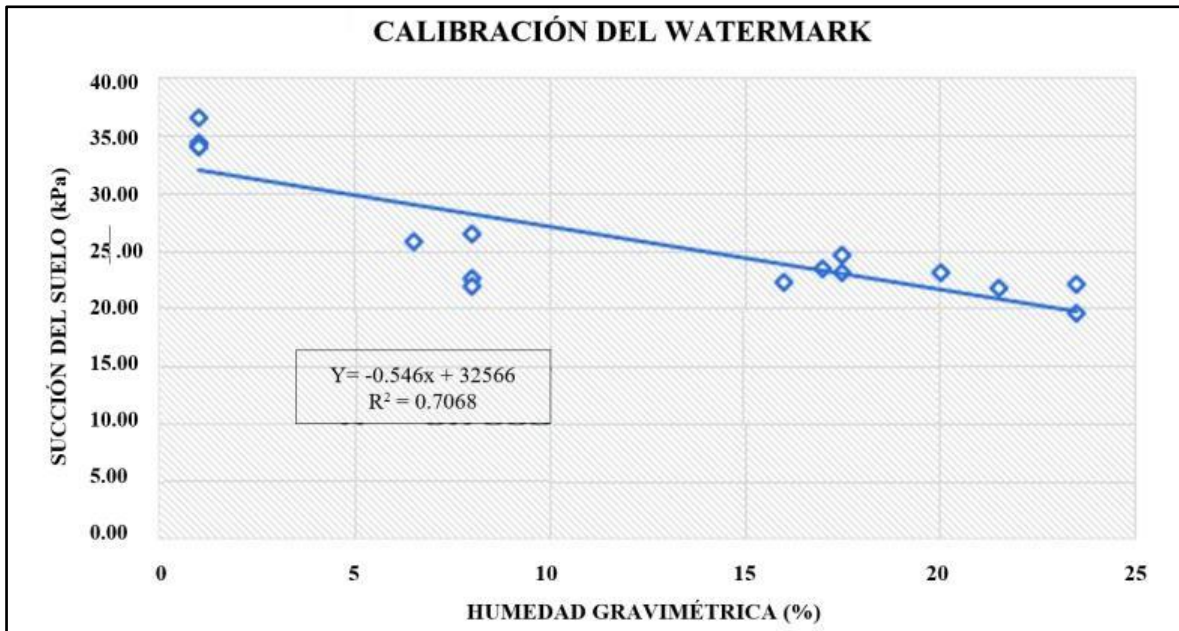


Figura 6: Curva de calibración de los sensores Watermark con la humedad gravimétrica de campo

Cuando se inició el periodo de déficit hídrico, se hicieron dos lecturas en las tres repeticiones de la poza en cuatro momentos, a los 5, 9, 11 y 14 días después de iniciado el periodo de sequía en la fase vegetativa. Para ello, se realizó la lectura en los dos sensores watermark ubicados en cada repetición del tratamiento de déficit hídrico. Estas mediciones fueron tomadas en el horario de 8 a 10 am.

3.7.4. Variables relacionadas al rendimiento

a. Acumulación de biomasa

Se determinó la materia seca en las hileras centrales de cada tratamiento, para lo cual, se tomaron plantas con raíz, luego se lavó la base de los tallos y las raíces fueron eliminadas. Posteriormente, se llevaron las hojas y los tallos a la estufa y se secaron a 70°C a peso constante. Se tomó un muestreo de esta variable en la fase de maduración fisiológica del cultivo.

b. Índice de cosecha

En dos repeticiones, antes de la cosecha se tomaron plantas en 0.20 m de la hilera, se lavó y se retiraron las raíces. A continuación, los granos de las panículas fueron removidos y

depositados en una bolsa de papel y el raquis, tallo y hojas fueron colocados en otra bolsa de papel. Finalmente, ambas bolsas correctamente rotuladas fueron llevadas a estufa a 70°C hasta obtener un peso constante. Para hallar el índice de cosecha (IC) se utilizó la siguiente fórmula:

$$IC = \frac{\text{Peso seco de granos}}{\text{Peso seco de granos} + \text{Peso seco de paja}} \times 100$$

c. Índices de selección

(Heros, 2019) indica, que se deben considerar las diferencias entre el rendimiento en condición óptima y el rendimiento que se obtiene en condición de déficit, para que se puedan identificar a los genotipos más tolerantes, que son los que tienen mínima diferencia. Si se tiene una diferencia amplia, quiere decir, que ese genotipo no es tolerante. Un mejor índice debe tener la capacidad de ayudar a distinguir genotipos que tengan una superioridad uniforme en ambientes de déficit y sin estrés (Darvishzadeh *et al.*, 2010). Para ello, con la variable rendimiento (t. ha⁻¹) se usan las fórmulas para obtener los índices de selección de la Tabla 7.

Tabla 7: Índices de selección utilizados para identificar los genotipos tolerantes a déficit hídrico

1. Índice de susceptibilidad al estrés	5. Índice de tolerancia al estrés
$SSI = \frac{1 - \left[\frac{Y_S}{Y_P} \right]}{1 - \left[\frac{\bar{Y}_S}{\bar{Y}_P} \right]}$	$STI = \frac{(Y_S)(Y_P)}{(\bar{Y}_P)^2}$
2. Productividad media geométrica	6. Índice de rendimiento
$GMP = \sqrt{(Y_S)(Y_P)}$	$YI = \frac{Y_S}{\bar{Y}_S}$
3. Productividad media	7. Media armónica
$MP = \frac{Y_S + Y_P}{2}$	$HM = \frac{2(Y_P * Y_S)}{Y_P + Y_S}$
4. Índice de tolerancia	8. Índice de estabilidad de rendimiento
$TOL = Y_P - Y_S$	$YSI = \frac{Y_S}{Y_P}$

FUENTE: Darvishzadeh *et al.* (2010)

3.7.5. Componentes del rendimiento

a. Número de panículas por metro cuadrado

En 0.50 m de la hilera central de cada parcela se contaron el número de panículas y esta variable fue expresada en número de panículas/m².

b. Número de granos por panícula

En dos repeticiones se tomaron diez panículas de cada parcela al azar y se determinó el número de granos llenos y vanos por panícula.

3.7.6. Variables agronómicas

a. Número de macollos por metro cuadrado

En 0.50 m de la hilera central de cada parcela de dos repeticiones por tratamiento, se contó el número de macollos por metro cuadrado. Esta evaluación fue realizada desde los 15 días después de la germinación hasta el máximo macollamiento en fase vegetativa.

b. Altura de Planta

Para evaluar esta variable se tomaron cuatro puntos en la hilera central en dos repeticiones por tratamiento midiendo la altura desde la base del tallo al ápice de la panícula más alta.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RENDIMIENTO (t. ha⁻¹)

En la Tabla 8, se observa que existen diferencias significativas en el manejo de agua de los dos tratamientos, siendo el suelo manejado en condiciones de inundación T1, el que mayor rendimiento promedio obtuvo (8.29 t. ha⁻¹) a diferencia del manejo de suelo en déficit hídrico en fase vegetativa (5.64 t. ha⁻¹).

Tabla 8: Rendimiento en grano (t. ha⁻¹) en los sistemas de manejo de agua

Tratamiento	Rendimiento (t. ha ⁻¹)	Significación*
Suelo inundado (T1)	8.29	a
Suelo en déficit hídrico (T2)	5.64	b

* Los rendimientos con una misma letra, no son significativamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey al 0.05%

Los rendimientos fueron influenciados por el manejo del agua al que se sometieron los genotipos, teniendo como respuesta, un menor rendimiento en los cultivados bajo déficit hídrico. Según Carrijo, *et al.* (2017) indican, que se puede utilizar la técnica AWD en diferentes grados: leves, medios y severos. En su estudio da a conocer que el uso del AWD leve (cuando el potencial hídrico del suelo era ≤ 20 kPa) causó una disminución del rendimiento en 5,4% por otro lado, el uso del AWD severo (cuando la sequía del suelo superaba los 20 kPa) tuvo pérdidas del rendimiento en 22.6% en comparación con el suelo inundado, estas pérdidas son mayores dependiendo de otros factores como el tipo de suelo, el momento de aplicación del AWD en el cultivo, condiciones climáticas, el pH del suelo, profundidad de la napa freática, genotipo, entre otros. En este experimento, se obtuvo una disminución del rendimiento promedio del tratamiento de déficit hídrico en fase vegetativa T2 del 32% respecto al rendimiento promedio del tratamiento inundado T1.

La Tabla 9, indica que los genotipos introducidos del IRRI: TP 30758 (10.12 t. ha⁻¹), TP 30598 (10.08 t. ha⁻¹), TP 30602 (9.72 t. ha⁻¹), TP 30757 (9.70 t. ha⁻¹), TP 24172 (9.66 t. ha⁻¹), TP 2677 (9.43 t. ha⁻¹), TP 30755 (9.36 t. ha⁻¹), Sahood Ulan1 (9.04 t. ha⁻¹), IR -71706 (8.59 t. ha⁻¹), TP 26717 (8.38 t. ha⁻¹) mostraron un mayor rendimiento que el promedio del tratamiento como se observa en la Figura 7.

Tabla 9: Prueba de comparación de medias Tukey para la variable rendimiento (t. ha⁻¹) en inundación

Genotipo	Rendimiento (t. ha⁻¹)	Significación*
TP 30758	10.12	a
TP 30598	10.08	a
TP 30602	9.72	a
TP 30757	9.70	a
TP 24172	9.66	a
TP 2677	9.43	ab
TP 30755	9.36	ab
Sahood Ulan 1	9.04	ab
IR-71706	8.59	ab
TP 26717	8.38	ab
Tinajones	7.49	ab
IR-43	7.32	ab
Mallares	7.12	ab
La Puntilla	6.68	ab
Fortaleza	6.63	ab
La Esperanza	6.30	ab
Vandana	5.34	b

* Los rendimientos con una misma letra, no son significativamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey al 0.05%

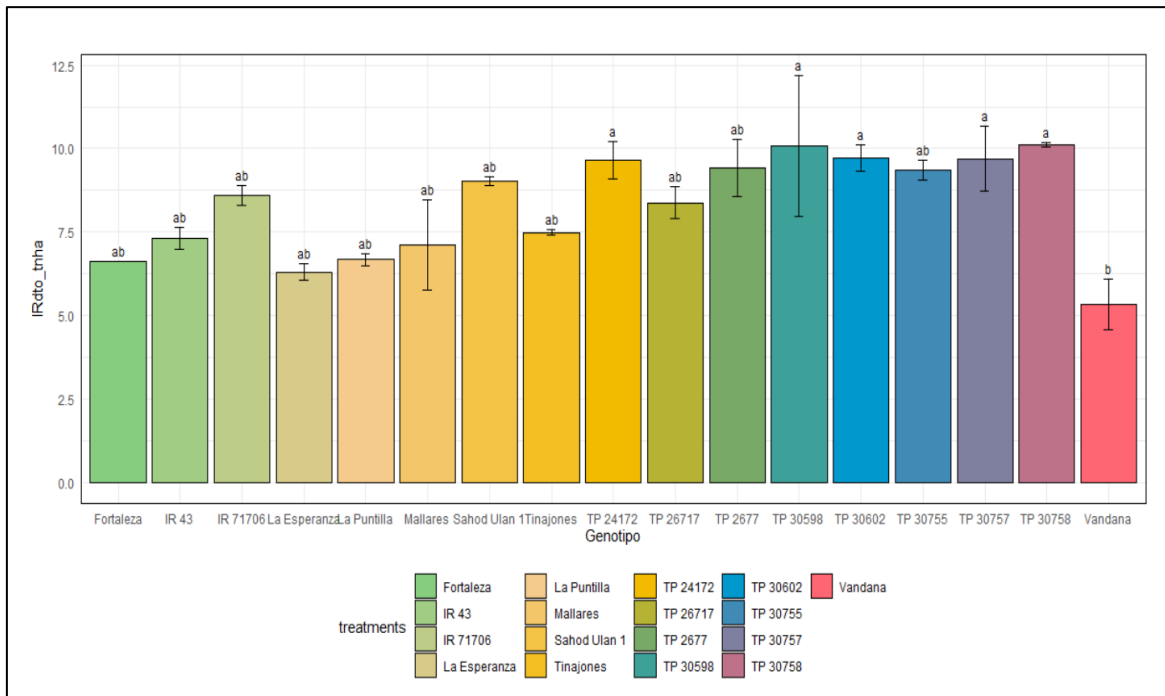


Figura 7: Rendimiento (T. ha⁻¹) de los genotipos cultivados en suelo inundado

En la Tabla 10, se observa que los rendimientos expresados por los genotipos sembrados en el suelo bajo condición de déficit hídrico, presentan comportamientos similares en el tratamiento bajo inundación. Por consiguiente, los genotipos del IRRI como: TP 30598 (7.52 t. ha⁻¹), TP 30758 (7.47 t. ha⁻¹), TP 2677 (7.44 t. ha⁻¹), TP 26717 (6.92 t. ha⁻¹), TP 24172 (6.89 t. ha⁻¹), TP 30755 (6.88 t. ha⁻¹), TP 30602 (6.82 t. ha⁻¹), IR-71706 (6.72 t. ha⁻¹), Sahood Ulan 1 (5.92 t. ha⁻¹), TP 30757 (5.89 t. ha⁻¹) mostraron también un mayor rendimiento que el promedio del tratamiento bajo déficit hídrico. Del mismo modo, los rendimientos de los genotipos comerciales fueron menores: La Puntilla (4.68 t. ha⁻¹), Mallares (4.30 t. ha⁻¹), IR-43 (4.03 t. ha⁻¹), Tinajones (3.96 t. ha⁻¹), Fortaleza (3.72 t. ha⁻¹), La esperanza (3.56 t. ha⁻¹) con la excepción de Vandana que fue el genotipo con el menor rendimiento promedio (3.15 t. ha⁻¹) como se observa en la Figura 8.

Tabla 10: Prueba de comparación de medias Tukey para la variable rendimiento (t. ha-1) en suelo en déficit hídrico en fase vegetativa

Genotipo	Rendimiento. (t. ha⁻¹)	Significación*
TP 30598	7.52	a
TP 30758	7.47	a
TP 2677	7.44	a
TP 26717	6.92	ab
TP 24172	6.89	ab
TP 30755	6.88	ab
TP 30602	6.82	ab
IR-71706	6.72	ab
Sahood Ulan 1	5.92	abc
TP 30757	5.89	abc
La Puntilla	4.68	bcd
Mallares	4.30	cd
IR-43	4.03	cd
Tinajones	3.96	cd
Fortaleza	3.72	cd
La Esperanza	3.56	d
Vandana	3.15	d

* Los rendimientos con una misma letra, no son significativamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey al 0.05%

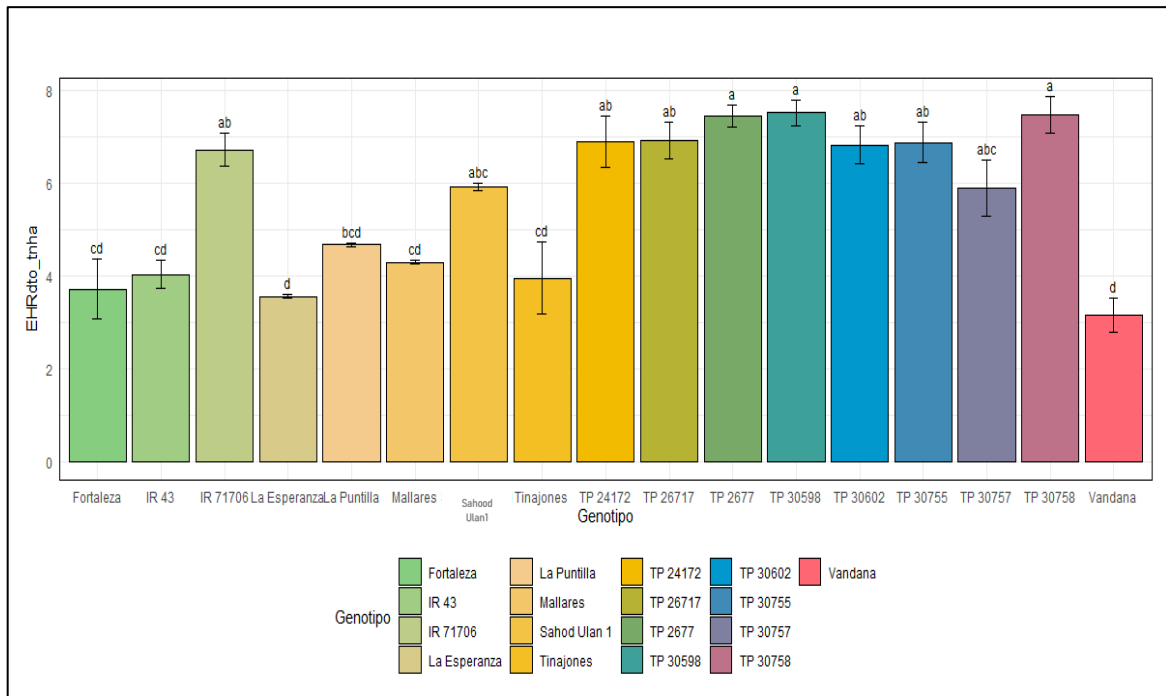


Figura 8: Rendimiento (t. ha⁻¹) de los genotipos cultivados en suelo con déficit hídrico

En resumen, en ambos tratamientos los genotipos del IRRI tuvieron rendimientos mayores que los cultivares comerciales, los cuales en inundación rindieron en promedio 9.40 (t. ha⁻¹) y en déficit hídrico en fase vegetativa mostraron rendimiento promedio de 6.85 (t. ha⁻¹).

Se observa la influencia del genotipo, a través de un comportamiento similar en ambos tratamientos, siendo notorio que los genotipos que tuvieron mejor adaptación al déficit hídrico, mostraron mejores rendimientos en condiciones óptimas y en sequía, a diferencia de los genotipos comerciales.

Esta variabilidad de respuesta de los genotipos, ha sido también reportada por Bouman y Tuong (2001), quienes indican que las variedades serán más o menos sensibles a la respuesta del déficit de agua en fase vegetativa o reproductiva y que la disminución del rendimiento se explica por la baja producción de biomasa, número de panículas, espiguillas y peso de 1000 granos. Por ello, indicaron que la sequía de la tecnología AWD no debe superar el rango de los (-20 a -30) kPa para que los genotipos no muestren reducciones tan significativas en sus rendimientos. Además, que se deben tomar en cuenta las características del suelo para definir la intensidad de aplicación de la técnica AWD.

En otros estudios, Liu (2013), indicó que la tecnología AWD a -15 kPa aumentó los valores de rendimiento en grano, porque obtuvo valores superiores del número de granos llenos por panícula y también un mayor peso de 1000 granos. Sin embargo, a -15 kPa no se registró ahorros significativos de agua.

Por otro lado, en el estudio de Zhang (2008), la técnica AWD se produjo en la etapa de madurez fisiológica, ya que realizó los drenajes de agua durante el llenado de grano permitiendo que las movilizaciones de los carbohidratos mejoraran, y con ello, el rendimiento en grano aumentó.

4.2. HUMEDAD GRAVIMÉTRICA DEL SUELO (%)

4.2.1. Medición de humedad gravimétrica con el equipo TDR (Reflectometría de dominio temporal)

Esta variable fue medida en el tratamiento (T2), que fue manejado en condiciones de déficit hídrico en fase vegetativa. Para realizar la medición de humedad del suelo, se usó el equipo TDR (Reflectometría de dominio temporal) con previa calibración del equipo con la humedad real de campo con el método gravimétrico y se obtuvo la siguiente fórmula: $Y = 0.0138x - 37.742$, que permitió determinar las mediciones de humedad de manera práctica en cuatro fechas de la etapa vegetativa (38 días después de la siembra (DDS), 42 DDS, 44 DDS y 47 DDS). El periodo de sequía se inició a los 33 días, y tuvo una duración de 15 días. Las evaluaciones de humedad gravimétrica de campo se realizaron independientemente en las tres repeticiones del tratamiento T2 a 20 cm del suelo y los resultados se expresan en la Tabla 11.

Tabla 11: Humedad gravimétrica (%) en las tres repeticiones del tratamiento T2 en cuatro determinaciones

T2 (E.H.)	38 DDS	42 DDS	44 DDS	47 DDS	Rendimiento (t. ha⁻¹)
Rep. 1	36.87	35.19	33.45	30.36	7.12
Rep. 2	34.50	32.98	31.84	28.67	5.68
Rep. 3	31.29	21.83	20.39	19.23	4.12

Según las características del suelo del tratamiento T2, la capacidad de campo fue de 29.80% y el punto de marchitez fue de 16.95%. La primera repetición del tratamiento T2 se encontraba adyacente a la toma de agua de riego, la segunda y tercera repetición (la más alejada de la toma de agua) no tuvieron influencia por infiltración.

Como se observa en la Tabla 11, en las cuatro evaluaciones la humedad gravimétrica del suelo en la primera repetición siempre fue mayor que la segunda y la tercera, debido a la influencia de la cercanía de la toma de agua. Además, la humedad de suelo disminuyó gradualmente conforme se alcanzaron los 15 días de sequía.

Hasta el último registro de datos, la humedad de la primera repetición (30.36%) no fue menor de la humedad de capacidad de campo (29.80%). En el caso de la segunda repetición, la humedad gravimétrica (28.67%) fue ligeramente menor que la humedad gravimétrica en capacidad de campo (29.80%). Finalmente, la humedad en la tercera repetición (19.23%) sí fue mucho menor que la humedad en capacidad de campo (29.80%), sin embargo, no llegó hasta los niveles de punto de marchitez (16.95%), como se observa en la Figura 9.

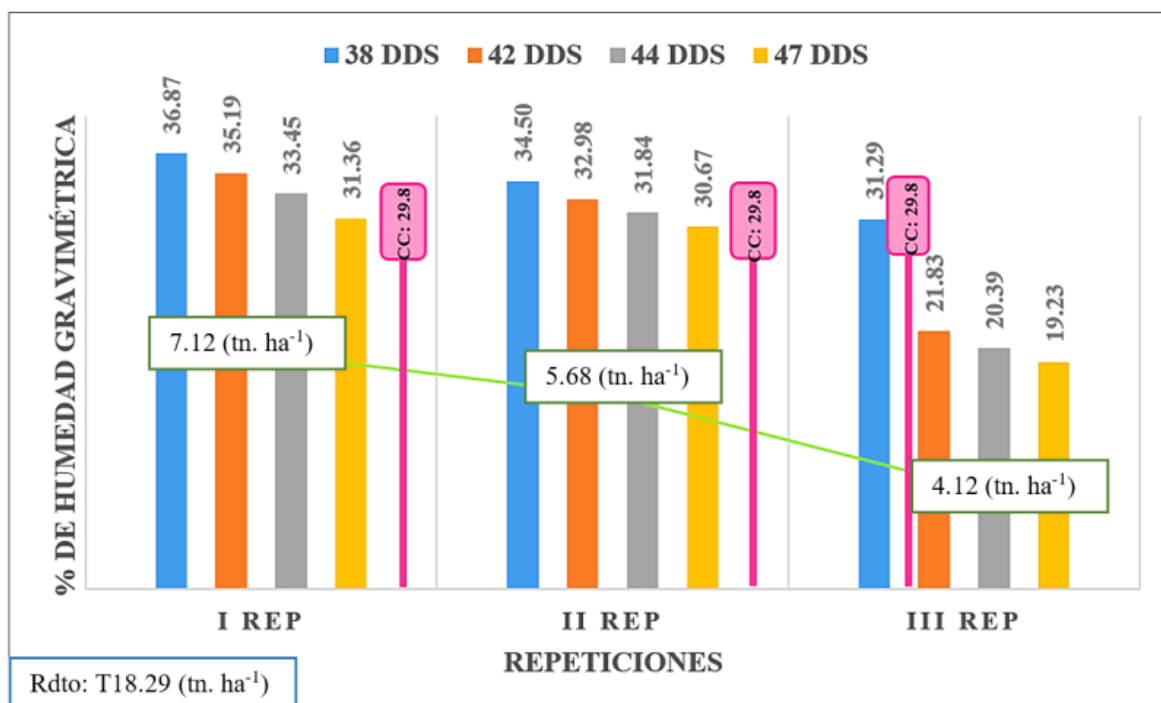


Figura 9: Humedad gravimétrica (%) en las tres repeticiones del tratamiento de suelo en déficit hídrico en fase vegetativa T2

4.2.2. Medición del potencial hídrico del suelo con los Sensores de humedad Watermark

Esta variable se midió con el equipo Watermark en el tratamiento T2, que mide la tensión que ejercen las raíces para succionar el agua del suelo manejado en condiciones de déficit hídrico en fase vegetativa. Para poder tomar las lecturas de tensión de humedad del suelo, se calibró previamente el equipo con la humedad real del campo con el método gravimétrico y se obtuvo la siguiente ecuación: $Y = -0.546x + 32.566$, que determinó la tensión ejercida por las raíces en condiciones de humedad en cuatro momentos del periodo de sequía en la etapa vegetativa a los 38 días después de la siembra (DDS), 42 DDS, 44 DDS y 47 DDS. Los resultados de las mediciones de los sensores watermark se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12: Medición del potencial hídrico con el equipo Watermark (kPa) en las tres repeticiones del tratamiento T2 en cuatro momentos

T2 (E.H.)	38 DDS	42 DDS	44 DDS	47 DDS	Rendimiento (t. ha ⁻¹)
Rep. 1	0 kPa	0 kPa	0 kPa	0 kPa	7.12
Rep. 2	0 kPa	0 kPa	0 kPa	-4 kPa	5.68
Rep. 3	-2 kPa	-20 kPa	-22 kPa	-24 kPa	4.12

En la Tabla 12, se observa las mediciones de la tensión del potencial hídrico a 0.2 m de profundidad del suelo en las tres repeticiones del tratamiento T2. En la primera repetición, los valores de humedad se mantuvieron constantes durante la época de secas hasta el día catorce que se registró 0 kPa. En la segunda repetición se obtuvo tres lecturas de 0 kPa hasta el día catorce, que registró -4 kPa. En la tercera repetición sí se ven diferencias en las tomas de lecturas de las cuatro fechas evaluadas, obteniendo al quinto día de sequía una lectura de -2 kPa, al noveno día -20 kPa, al onceavo día -22 kPa y al día 14 (-24 kPa).

El rendimiento promedio del tratamiento en inundación T1 alcanzó 8.29 t. ha⁻¹. En cuanto a los rendimientos de las tres repeticiones del tratamiento T2, podemos notar que la primera repetición obtuvo 7.12 t. ha⁻¹, el cual representa una reducción del 14.11% frente al tratamiento T1. La segunda repetición obtuvo 5.68 t. ha⁻¹, reduciendo su rendimiento en 31.48% y finalmente la tercera repetición (4.12 t. ha⁻¹) presenta una reducción del 49.70%. Bouman *et al.* (2007), clasificaron la intensidad de aplicación de la técnica AWD como leve y severo. El término AWD severo se registró cuando la humedad en la zona de raíces por

debajo de 15 cm del suelo descendió a ≥ 20 kPa o más. Por contraparte, el término AWD leve, se da cuando no se permite que la humedad en la zona de raíces a 15 cm bajo el suelo caiga por debajo de ≥ 20 kPa. Del mismo modo, Carrijo *et al.* (2017), indican que el uso del AWD leve disminuye el rendimiento en un 5.4% a comparación del manejo en un suelo inundado. En de la aplicación de la técnica AWD severa (mayor o igual a ≥ 20 kPa) se produce una reducción del rendimiento en 22.6%. A esto se suma el tipo de siembra, si es directa o trasplante, el número de drenajes realizados, el tipo de genotipo sembrado, las características del suelo, el clima, y el momento fenológico de aplicación de la tecnología AWD.

4.2.3. Monitoreo de la napa freática

El monitoreo del nivel de la napa freática se realizó al iniciar el periodo de déficit hídrico en etapa vegetativa. Para este fin, se realizó una perforación de 100 cm. de profundidad con la ayuda de un barreno en las parcelas y con una cinta métrica se midió el nivel del agua por debajo de la superficie del suelo.

Tabla 13: Medición de la napa freática a 100 cm por debajo de la superficie del suelo en el tratamiento de déficit hídrico en etapa vegetativa

Días	Nivel del agua por debajo de la superficie del suelo (cm)											
	15/02	18/02	20/02	21/02	22/02	24/02	25/02	26/02	27/02	28/02	29/02	02/03
Profundidad (cm)	71	76.3	74.3	79.8	80.8	81.4	80.1	78.9	76.6	74.5	75.3	76.8

En la Tabla 13 se observan los niveles del agua de la napa freática bajo la superficie del suelo en el tratamiento T2 en los días de sequía, estos valores fluctúan entre 71 cm al inicio de la etapa de déficit hídrico hasta 76.8 cm en el día catorce de sequía. Los valores más altos (80.8 y 81.4 cm) se presentaron en la etapa media de los quince días en los días 8 y 9, por influencia de las áreas arroceras vecinas (Figura 10).

Nelson *et al.* (2015) indican, que posterior a las tres o cuatro semanas después de la siembra, se permite que el campo entre en sequía durante dos o tres semanas hasta que el nivel freático fluctúe entre 10 y 15 cm por debajo de la superficie del suelo. Cuando se alcanza el umbral, se debe regar el campo hasta tener una lámina estática de 3 a 5 cm. Además, sugieren que el umbral de la napa freática debe llegar hasta 15 cm debajo del suelo para que los rendimientos no se vean afectados por el déficit hídrico.

Bouman y Tuong (2001) señalan que el método AWD puede reducir el consumo de agua hasta en un 37 %, sin afectar el rendimiento del cultivo. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que los suelos de textura arenosa, tiene una menor retención del agua por el rápido drenaje y que el uso de la tecnología AWD severo puede traer consigo importantes pérdidas del rendimiento (Carrijo *et al.*, 2017).

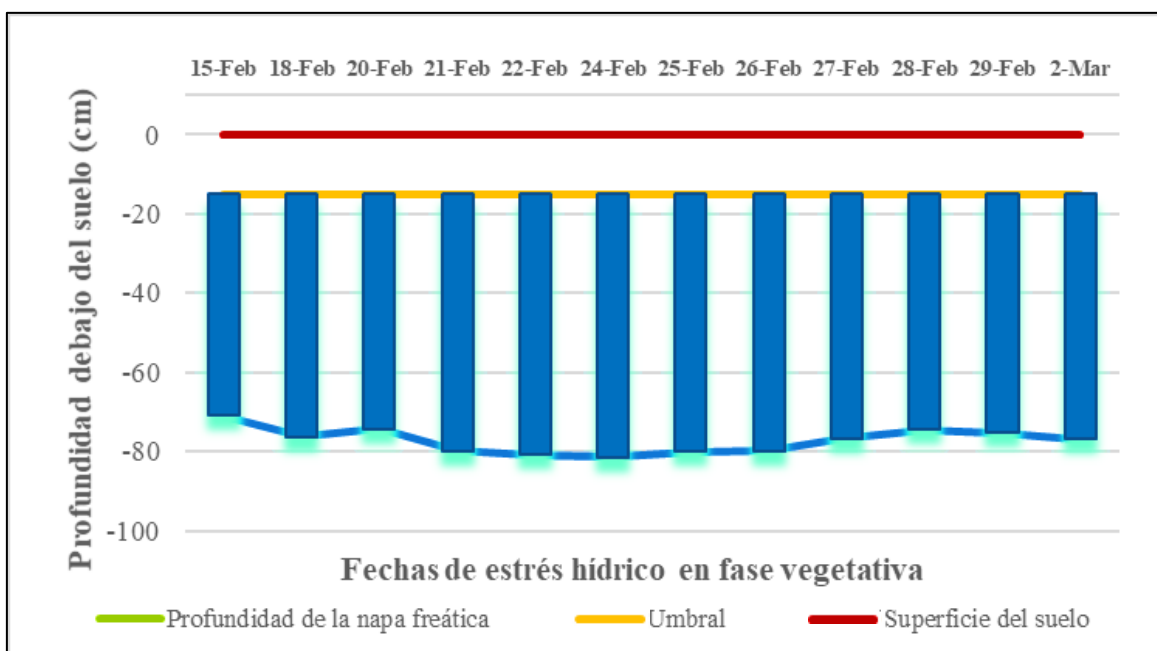


Figura 10: Mediciones de la profundidad de la napa freática (cm) en el tratamiento T2 de manejo del suelo en déficit hídrico en fase vegetativa

4.3. VARIABLES RELACIONADAS AL RENDIMIENTO

4.3.1. Acumulación de biomasa

Los tratamientos muestran diferencias significativas (Tabla 14), en la que el tratamiento T1, obtuvo la mayor acumulación de biomasa en maduración (18.33 t. ha⁻¹) en comparación al tratamiento de déficit hídrico T2 (15.94 t. ha⁻¹). Esto indica que los genotipos en nivel de déficit hídrico, tienen una reducción significativa de biomasa a diferencia de cultivado en condiciones de inundación.

Tabla 14: Acumulación de biomasa (t. ha⁻¹) en maduración, en condiciones de inundación y déficit hídrico

Tratamiento	Biomasa a la Maduración. (t. ha ⁻¹)	Significación*
Suelo Inundado (T1)	18.33	a
Suelo en déficit hídrico (T2)	15.94	b

*Los valores promedio con una misma letra, no son significativamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey al 0.05%

Asch *et al.* (2005), afirman que las condiciones de sequía reducen el área foliar del arroz, y esto se acentúa más, de acuerdo al momento fenológico de la planta donde se aplica la sequía, demostrando que someter al déficit hídrico a las plantas de arroz en su primera etapa de desarrollo tiene poco efecto sobre el rendimiento pero sí reduce en índice de área foliar, lo que trae como consecuencias la limitación en la formación de granos por panículas y una posible reducción en el peso de 1000 granos.

Para la variable producción de biomasa al estado de madurez fisiológica, permite observar, que en promedio para los genotipos se encuentran diferencias estadísticas significativas (Tabla 15), siendo, en su mayoría, los genotipos introducidos del IRRI los que mejor performance muestran; se puede observar que, TP 30758 (20.59 t. ha⁻¹), IR-71706 (20.43 t. ha⁻¹), TP 2677 (20.22 t. ha⁻¹) y Sahood Ulan 1 (20.10 t. ha⁻¹) fueron superiores; por otro lado, los genotipos que tuvieron los menores valores fueron TP 26717 (17.03 t. ha⁻¹), Fortaleza (15.61 t. ha⁻¹), La Esperanza (14.50 t. ha⁻¹) y Vandana con 13.82 t. ha⁻¹

Tabla 15: Prueba de comparación de medias Tukey para la medición de biomasa en maduración (t. ha⁻¹) bajo suelo inundado

Genotipo	Biomasa a la maduración (t. ha ⁻¹)	Significación*
TP 30758	20.59	a
IR-71706	20.43	a
TP 2677	20.22	ab
Sahood Ulan 1	20.10	abc
TP 30598	19.98	abc
TP 24172	19.59	abc

«Continuación»

TP 30755	19.30	abc
TP 30602	19.25	abc
TP 30757	19.17	abc
IR-43	18.75	abc
Tinajones	18.42	abcd
Mallares	17.65	abcd
La Puntilla	17.14	bcde
TP 26717	17.03	cde
Fortaleza	15.61	def
La Esperanza	14.50	ef
Vandana	13.82	f

*Los valores promedio con una misma letra, no son significativamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey al 0.05%

La Tabla 16, muestra que existen diferencias significativas en la producción de biomasa en madurez fisiológica, en condiciones de déficit hídrico, mostrando que los genotipos importados del IRRI (con excepción de Vandana) presentan valores más altos que los genotipos del INIA e IR-43. Siendo IR- 71706 (19.60 t. ha⁻¹), TP 26717 (19.60 t. ha⁻¹), TP 2677 (19.43 t. ha⁻¹), y TP 30755 (19.30 t. ha⁻¹) los que obtuvieron la mayor producción. Finalmente, IR-43 (11.37 t. ha⁻¹), Vandana (11.10 t. ha⁻¹), Tinajones (10.71 t. ha⁻¹), y La Esperanza con 9.69 t. ha⁻¹, produjeron la menor cantidad.

Tabla 16: Prueba de comparación de medias Tukey para la medición de biomasa en maduración (t ha⁻¹) bajo suelo en déficit hídrico en fase vegetativa

Genotipo	Biomasa a la maduración (t. ha ⁻¹)	Significación*
IR-71706	19.60	a
TP 26717	19.60	a
TP 2677	19.43	a
TP 30755	19.30	a
TP 30602	18.91	a
TP 30758	18.88	a
TP 24172	18.72	a
TP 30598	18.41	a
Sahood Ulan 1	17.38	ab

«Continuación»

TP 30757	16.88	ab
Mallares	15.22	abc
Fortaleza	13.07	bcd
La Puntilla	12.78	bcd
IR-43	11.37	cd
Vandana	11.10	cd
Tinajones	10.71	cd
La Esperanza	9.69	d

*Los valores promedio con una misma letra, no son significativamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey al 0.05%.

Bueno *et al.* (2010) afirman que los genotipos sembrados en déficit hídrico tienden a formar menos materia seca que cuando son sembrados en condiciones óptimas de humedad, sin embargo, los rendimientos no disminuyen drásticamente en los genotipos más adaptados a sequía, porque tienden a producir menos macollos, que son más productivos en floración, por una mayor acumulación de carbohidratos almacenados y disponibles para el llenado del grano.

Según Bunnag y Pongthai (2013), afirman que se puede atribuir la reducción de la materia seca en los genotipos sometidos a déficit hídrico, a la disminución de la tasa fotosintética y a la poca disponibilidad de nutrientes. Esto se debe, porque las plantas no pueden absorber fácilmente el agua del suelo, limitando la llegada de los elementos esenciales a los tejidos nuevos. Del mismo modo, afirman que el déficit por sequía reduce la expansión de las hojas, el macollamiento y el crecimiento de los tallos, lo que produce una menor biomasa.

Como conclusión indican, que los genotipos con mayor adaptación a la sequía tenían tallos más débiles, panículas con una mejor distribución que contenían menos granos vanos y los granos eran más pesados en la madurez a diferencia de los genotipos que no están adaptados, los cuales presentaban una mayor cantidad de granos vanos y menor peso que los granos llenos en condiciones óptimas.

4.3.2. Índice de cosecha

Los resultados en la Tabla 17, muestran que el T1 obtuvo un mayor índice de cosecha (44%) a diferencia del T2, que presentó un índice de cosecha de 37%. Finalmente, se puede afirmar que la variable índice de cosecha, fue influenciada por la técnica de manejo AWD en fase vegetativa.

Tabla 17: Índice de cosecha (%) en los dos sistemas de manejo de agua

Tratamiento	Índice de cosecha (%)	Significación*
Suelo Inundado (T1)	44	a
Suelo en déficit hídrico (T2)	37	b

*Los valores promedio con una misma letra, no son significativamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey al 0.05%.

4.4. COMPONENTES DEL RENDIMIENTO

4.4.1. Número de panículas por metro cuadrado

En la Tabla 18, se muestra el resumen de las comparaciones entre los dos tratamientos estudiados. Se observa, que en el tratamiento T1, los genotipos sembrados en suelo inundado, obtuvieron el mayor número de panículas por metro cuadrado (422), que el tratamiento T2, cuyos genotipos fueron sembrados en un suelo bajo condición de déficit hídrico en fase vegetativa, que tuvo en promedio 323 panículas por metro cuadrado. Con estos resultados, se puede indicar que el uso de la tecnología AWD tiene influencia significativa en esta variable.

Tabla 18: Número de panículas por metro cuadrado bajo dos sistemas de manejo de agua

Tratamiento	Número de panículas por metro cuadrado	Significación*
Suelo Inundado (T1)	422	a
Suelo en déficit hídrico (T2)	323	b

*Los valores promedio con una misma letra, no son significativamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey al 0.05%.

Bunnag y Pongthai (2013), realizaron un estudio que incluía el manejo de la técnica AWD hasta -15 kPa a los 10 días de realizarse el trasplante en fase vegetativa. Los resultados que obtuvieron fueron que con el manejo AWD mantuvo un aumento del rendimiento promedio de grano de las variedades sometidas a esta técnica, frente al manejo en suelo inundado, sin embargo, el AWD disminuyó el número de panículas de los genotipos, pero aumentó el número de espiguillas por panícula, esto determinó que el rendimiento final fuera mayor que en el tratamiento inundado. Para la formación de grano y llenado de este, la temperatura y humedad de suelo son variables muy relevantes, por lo que se recomienda que los sometimientos a déficit de los genotipos no sean tan drásticos y mantengan los límites recomendados de -15 a -20 kPa, en cuanto a humedad del suelo, y no influyan negativamente en los componentes del rendimiento.

En la Tabla 19, según la comparación de medias de Tukey, se observa que los genotipos en condiciones de suelo inundado, presentaron mayor número de panículas y son los que también lideran el rendimiento. Asimismo, los genotipos que registraron menores rendimientos ($t. ha^{-1}$) muestran un menor número de panículas por metro cuadrado.

Tabla 19: Prueba de comparación de medias Tukey para la variable número de panículas por metro cuadrado de genotipos en suelo inundado

Genotipo	Número de panículas por metro cuadrado	Significación*
TP 30758	500	a
TP 24172	487	ab
TP 30757	482	b
TP 30598	474	bc
TP 30755	473	bc
TP 2677	471	bc
IR-71706	464	cd
IR-43	450	de
TP 30602	447	de
Sahood Ulan 1	434	e
TP 26717	413	f
Tinajones	398	f
La Puntilla	364	g
Mallares	343	h
Fortaleza	331	hi
La Esperanza	327	hi
Vandana	316	i

*Los valores promedio con una misma letra, no son significativamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey al 0.05%.

En la Tabla 20, se puede observar de igual manera las tendencias similares a las condiciones de inundación. Los genotipos importados del IRRI y manejados en suelo bajo condición de déficit hídrico en fase vegetativa, muestran en la variable número de panículas por metro cuadrado, valores más altos que los genotipos comerciales.

Tabla 20: Prueba de comparación de medias Tukey para la medición número de panículas por metro cuadrado para suelo con déficit hídrico en fase vegetativa

Genotipo	Número de panículas por metro cuadrado	Significación*
TP 30598	399	a
TP 30758	381	ab
TP 2677	370	bc
TP 26717	361	bc
IR-71706	358	bcd
TP 30602	349	cde
TP 30755	345	cde
TP 24172	332	def
Sahood Ulan 1	327	efg
TP 30757	316	fgh
La Puntilla	310	fgh
Fortaleza	303	ghi
Mallares	291	hij
IR-43	276	ijk
La Esperanza	267	jk
Tinajones	260	k
Vandana	258	k

*Los valores promedio con una misma letra, no son significativamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey al 0.05%.

Finalmente, Yao *et al.* (2012) indicó que existe una reducción del número de panículas en los genotipos manejados bajo AWD que está influenciada por diversos factores, siendo el componente genético, uno de los factores importantes.

4.4.2. Número de granos llenos por panícula

En la Tabla 21, la prueba Tukey de comparación de medias, muestra que el número de granos llenos por panículas entre ambos tratamientos presentan diferencias significativas. El tratamiento T1 obtuvo mayor número de granos llenos por panículas (134) mientras que el tratamiento T2 tuvo menos granos (120). Estos resultados indican que esta variable está relacionada con el manejo de la técnica AWD.

Tabla 21: Número de granos llenos por panícula bajo dos sistemas de manejo de agua

Tratamiento	Número de granos llenos por panícula	Significación*
Suelo Inundado (T1)	134	a
Suelo en déficit hídrico (T2)	120	b

*Los valores promedio con una misma letra, no son significativamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey al 0.05%.

Según Oliver (2008), indica que el número de granos por panícula es mayor en suelos inundados y que la técnica AWD, disminuye el número de granos dependiendo de la severidad con el que se aplicó este manejo.

En el presente estudio, el número de granos por panícula, en suelo bajo manejo de déficit hídrico obtuvo una reducción del 10.8% frente a los resultados obtenidos en la siembra de genotipos en suelo de manejo inundado.

4.4.3. Peso de 1000 granos

En la Tabla 22, la prueba Tukey de comparación de medias para la variable peso de 1000 granos (g), muestra que en los dos tratamientos se encuentran diferencias significativas. El tratamiento T2 de manejo de suelo en déficit hídrico presentó un mayor promedio de peso de 1000 granos (33 g) frente al tratamiento T1 de suelo inundado (27 g).

Tabla 22: Peso de 1000 granos (g) bajo dos sistemas de manejo de agua.

Tratamiento	Peso de 1000 granos (g)	Significación*
Suelo Inundado (T1)	27	b
Suelo en déficit hídrico (T2)	33	a

*Los valores promedio con una misma letra, no son significativamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey al 0.05%

Kristian *et al.* (2023) en su estudio, de dos variedades en dos ambientes, de inundación y bajo la técnica AWD, afirmaron que cuando fueron sometidos a la técnica AWD, tuvieron un menor número de macollos productivos y peso de 1000 granos más altos a diferencia de las variedades que presentaban un mayor número de panículas, que obtuvieron menos peso de granos.

Bunnag y Pongthai (2013) señalan que la variable peso de 1000 granos, es una característica asociada a factores como: biomasa de la raíz, índice de área foliar, tasa fotosintética que influyen en un mejor llenado de grano, y en este estudio se confirma que el peso de los 1000 granos es una característica más asociada al genotipo que a otros factores que pueden influir en su expresión.

4.5. VARIABLES AGRONÓMICAS

4.5.1. Número de macollos por metro cuadrado

La evaluación de esta variable se realizó en cuatro fechas: 16 días después del riego de germinación (DDRG), 17 DDRG, 45 DDRG y 55 DDRG para los dos tratamientos. Para el análisis estadístico, solo se tomaron en cuenta los datos obtenidos en la última medición (55 DDRG). La siguiente tabla 23, muestra el resumen de los datos de la comparación entre los dos tratamientos estudiados.

Tabla 23: Número de macollos por metro cuadrado evaluado en cuatro fechas en fase vegetativa

Tratamientos	Número de macollos por metro cuadrado			
	16 DDRG	27 DDRG	45 DDRG	55 DDRG*
Suelo Inundado (T1)	40	83	138	173 a
Suelo en déficit hídrico (T2)	39	57	116	140 b

*Los valores promedio con una misma letra, no son significativamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey al 0.05%

En la Figura 11, se muestran que los resultados de las cuatro fechas de mediciones del tratamiento T1, presentaron valores más altos frente al tratamiento T2. La misma situación se repite en la última evaluación a los 55 días después del riego de germinación, donde el tratamiento T1 alcanza (173) macollos por metro cuadrado a comparación del tratamiento T2 que alcanzó (140) macollos. Estos resultados muestran diferencias significativas para la variable número de macollos por metro cuadrado.

Según Oliver (2008), afirma que se demostró que a mayor severidad del uso de la técnica AWD, el número de macollos disminuye. En el presente estudio hubo una reducción del 19%.

Asimismo, Mostajeran y Rahimi-Eichi (2009) indican, que la disminución en la producción de macollos, se puede dar por la reducción de la tasa fotosintética, que merma la producción de asimilados que toma la planta, afectada con la sequía.

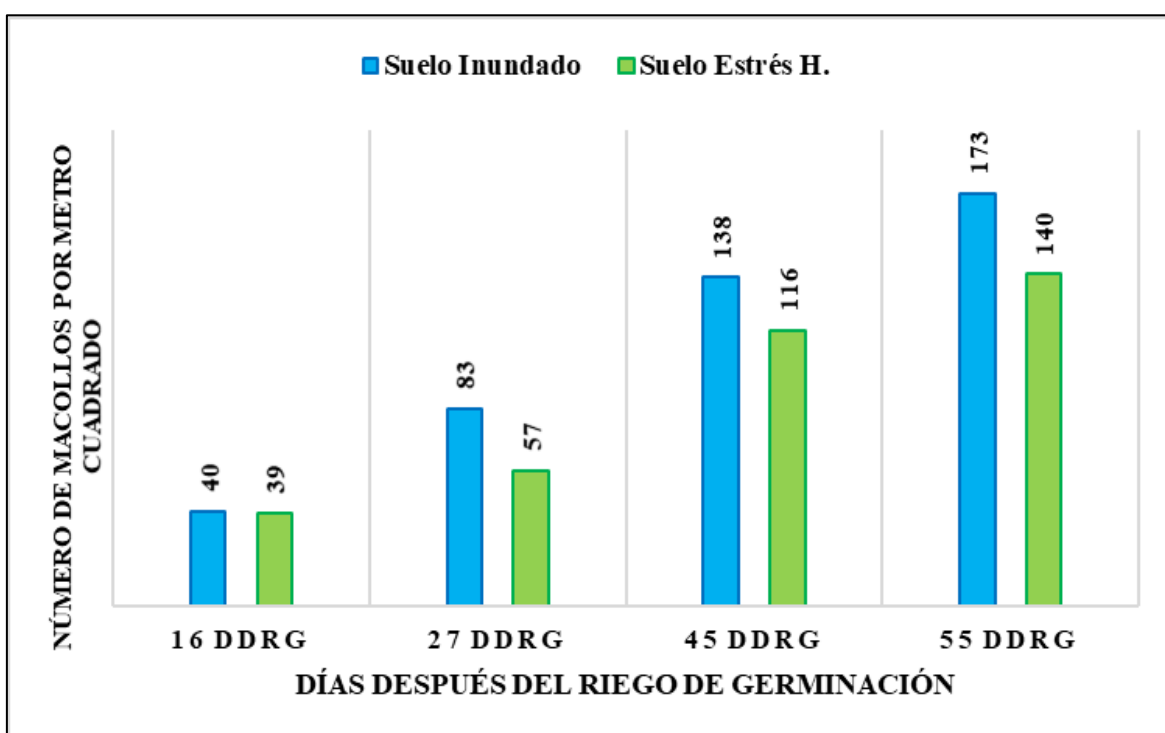


Figura 11: Número de macollos por metro cuadrado medido en cuatro ocasiones luego del riego de germinación

4.5.2. Altura de planta

La evaluación de esta variable se realizó en nueve fechas después del riego de germinación (DDRGR) en los dos tratamientos. Para la evaluación estadística se usaron solo los datos de la última evaluación (125 DDRGR). En la Tabla 24, se observan los resultados de las nueve mediciones y la Figura 12 muestra el crecimiento en cm de los tratamientos en las tres etapas fenológicas.

Tabla 24: Altura de planta (cm) evaluado en 9 fechas a lo largo de las tres etapas fenológicas de crecimiento

Tratamientos	Altura de planta								
	16 DDRG	27 DDRG	45 DDRG	55 DDRG	68 DDRG	88 DDRG	98 DDRG	111 DDRG	125 DDRG*
Suelo Inundado (T1)	16.85	21.44	50.33	58.07	75.34	90.98	93.74	95.61	98.08a
Suelo en déficit hídrico (T2)	14.33	18.36	35.02	39.57	65.25	78.53	83.18	86.89	89.13b

*Los valores promedio con una misma letra, no son significativamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey al 0.05%.

Los resultados obtenidos en esta medición muestran que el tratamiento T1 alcanzó la mayor altura a lo largo del crecimiento y desarrollo de las plantas. Como se observa en la Figura 12, la última evaluación analizada estadísticamente, prueba que sí existen diferencias significativas en ambos tratamientos, ya que el último registro del tratamiento T1 fue de (98.08 cm) frente al tratamiento T2 que registró en promedio (89.13 cm) un 9.12% menos que el primer tratamiento. Con estos resultados podemos afirmar que la variable altura de planta está influenciada por el manejo de agua al cual se somete el cultivo.

Este comportamiento también es registrado por Ishfaq *et al.* (2020), quienes indican que realizar la técnica AWD de manera severa, genera que las raíces se desarrollen pobremente en comparación de las raíces que se desarrollan en un ambiente de riego óptimo, ocasionando consecuencias como la disminución de la altura de planta.

Del mismo modo, Bunnag y Pongthai (2013), afirman que se pueden encontrar diferencias significativas en la altura de la planta causado por el menor crecimiento celular y menor crecimiento de nudos, entrenudos y tallos, los cuales se ven afectadas por la sequía y el genotipo.

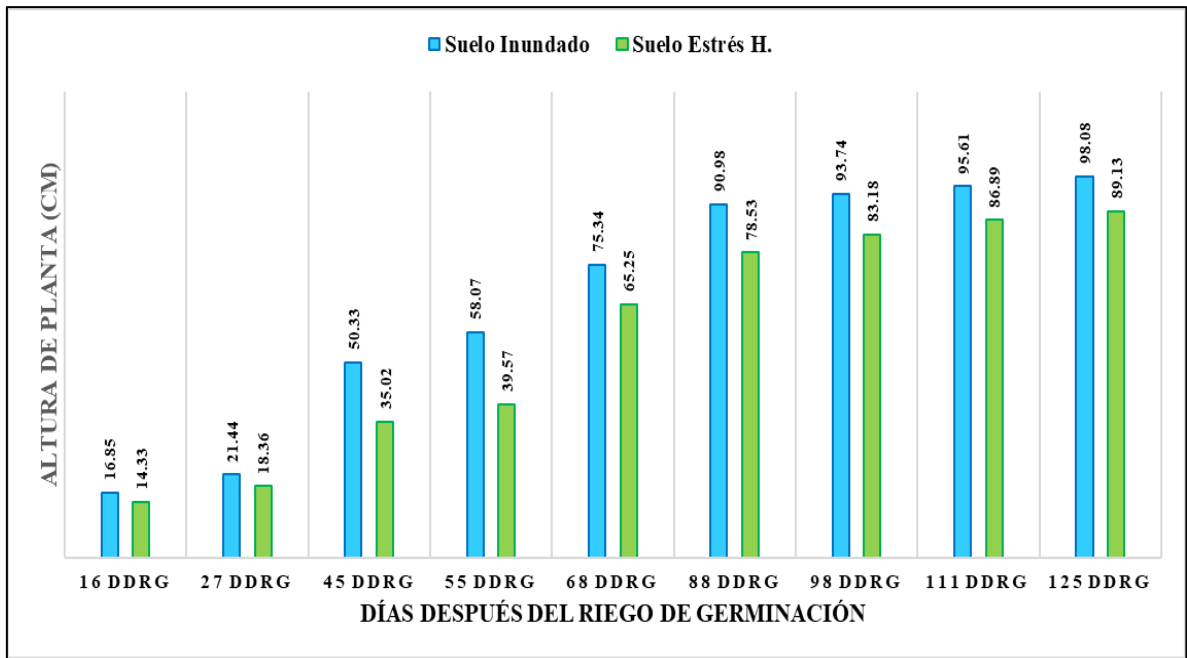


Figura 12: Altura de planta (cm) evaluada por fases fenológicas

4.5.3. Periodo de Maduración (días)

La medición de esta variable se realizó cuando los granos de cada genotipo alcanzaron la madurez fisiológica. Para ello, se registraron las fechas de maduración y se determinó el número de días desde el riego de germinación. En la prueba de Tukey de comparación de medias (Tabla 25), se observa que el promedio de días a la maduración en los dos tratamientos, sí presentan diferencias significativas.

Tabla 25: Periodo de Maduración (días) en dos sistemas de manejo de agua

Tratamiento	Promedio de días a la maduración	Significancia*
Suelo Inundado (T1)	119	b
Suelo en déficit hídrico (T2)	128	a

*Los valores promedio con una misma letra, no son significativamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey al 0.05%.

El tratamiento T1 de manejo de suelo inundado tuvo un menor periodo de maduración (119 días) mientras que el tratamiento T2 alcanzó la madurez de granos a los 128 días en promedio. La comparación de medias de la Prueba Tukey (Tabla 26) indica que el periodo de maduración (días) en el manejo de suelo inundado, presenta diferencias significativas, siendo los cultivares comerciales IR- 43 (134 días), Mallares (131 días), La Puntilla (129

días), TP 2677 y la Esperanza (127 días), Tinajones (126 días), Fortaleza (124 días) los que más tardaron en alcanzar la maduración fisiológica que los genotipos introducidos por el IRRI como TP 26717 y TP 30758 (113 días), TP 30602 (112 días), TP 30598 (110 días), Sahood Ulan 1 (109 días) y Vandana, el más precoz con 95 días.

Tabla 26: Prueba de comparación de medias Tukey para el periodo de maduración (Días) en el tratamiento de inundación

Genotipo	Días a la maduración	Significancia*
IR-43	134	a
Mallares	131	a
La Puntilla	129	ab
TP 2677	127	abc
La Esperanza	127	abc
Tinajones	126	abc
Fortaleza	124	abc
TP 30757	120	bcd
TP 24172	119	bcd
IR-71706	118	cde
TP 30755	117	cde
TP 26717	113	de
TP 30758	113	de
TP 30602	112	de
TP 30598	110	de
Sahood Ulan 1	109	e
Vandana	95	f

*Los valores promedio con una misma letra, no son significativamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey al 0.05%.

En la Tabla 27, los resultados de comparación de medias de Tukey para la variable periodo de maduración (días) en el manejo de suelo de déficit hídrico, muestran la misma tendencia presentada en el ambiente de inundación, donde los cultivares comerciales como: La Esperanza (144 días), IR 43 (137 días), Fortaleza y Mallares (136 días) La Puntilla (135 días) y Tinajones (131 días) los que tardaron más en llegar a la madurez fisiológica que los genotipos introducidos por el IRRI como TP 30598 (127 días), TP 26717 (125 días), TP 30602 (121 días), TP 30758 (120 días), Sahood Ulan 1 (113 días) y Vandana siendo el más precoz con 105 días.

Tabla 27: Prueba de comparación de medias Tukey para el periodo de maduración (Días) en el tratamiento de déficit hídrico en fase vegetativa

Genotipo	Días a la maduración	Significancia*
La Esperanza	144	a
IR-43	137	ab
Fortaleza	136	ab
Mallares	136	ab
La Puntilla	135	abc
Tinajones	131	abcd
TP 24172	130	bcd
TP 30755	130	bcd
IR-71706	129	bcd
TP 2677	129	bcd
TP 30757	128	bcd
TP 30598	127	bcde
TP 26717	125	bcde
TP 30602	121	cde
TP 30758	120	de
Sahood Ulan 1	113	ef
Vandana	105	f

*Los valores promedio con una misma letra, no son significativamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey al 0.05%.

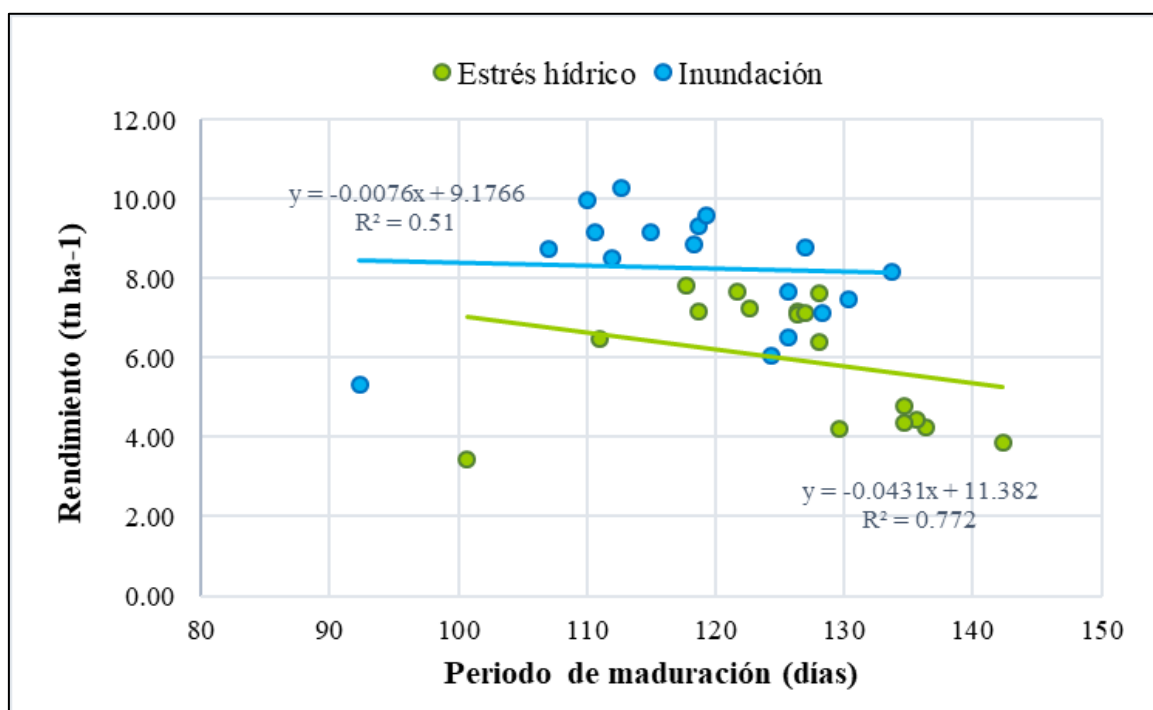


Figura 13: Correlación del Rendimiento (t ha⁻¹) vs periodos de maduración fisiológica (Días) en dos ambientes

En la Figura 13, se observa la relación entre el rendimiento ($t. ha^{-1}$) vs los periodos de madurez fisiológica en inundación (T1) y en déficit hídrico en fase vegetativa (T2). En el tratamiento T1, se obtuvieron mayores rendimientos en menores periodos de maduración a comparación del tratamiento T2 que tuvo menor productividad en maduraciones fisiológicas tardías. Según Dingkunhn y Asch (1999), indican que las plantas de arroz que completan su ciclo de vida en un periodo más corto, utilizan menos cantidad de agua. La duración del periodo de un cultivo está relacionada intrínsecamente con el genotipo y la respuesta de este al ambiente donde se desarrolla. Estas dos variables determinan la capacidad de un cultivo de completar su ciclo en menor tiempo.

El desarrollo de variedades de corto periodo, ha sido una estrategia efectiva para disminuir la pérdida del rendimiento por sequía. Esto se debe, porque la madurez temprana ayuda al cultivo a evitar llegar a los periodos de déficit. Sin embargo, el rendimiento se relaciona con un periodo de crecimiento en óptimas condiciones y cualquier condición crítica desfavorable disminuiría drásticamente el rendimiento (Kumar y Abbo, 2001). Para el ambiente agroecológico de la Costa Norte del país, en que se cultiva el arroz con cultivares tardíos (150 días de maduración), es posible desarrollar cultivares precoces de 120 días para condiciones de inundación. Periodos más cortos de maduración permitiría menor consumo de agua y mayor eficiencia de uso de agua. Menor periodo de maduración, implica que los nuevos cultivares tengan adaptación a siembra directa, que también contribuiría a mejorar la productividad del agua y a la rentabilidad del agua, mejorando la situación socioeconómica de los productores de arroz.

4.6. CORRELACIÓN ENTRE LOS DIFERENTES ÍNDICES DE TOLERANCIA AL ESTRÉS Y RENDIMIENTO PROMEDIO DE GENOTIPOS DE ARROZ EN CONDICIONES DE SUELO INUNDADO Y SUELO EN DÉFICIT HÍDRICO EN FASE VEGETATIVA

En la Figura 14, se observa que el índice de susceptibilidad al estrés (ISE) muestra correlación negativa alta con productividad media geométrica (PMG), productividad media (PM), índice de tolerancia al estrés (ITE), índice de rendimiento (IR), media armónica (MH) e índice de estabilidad de rendimiento (IER) que van de 0.77, 0.74, 0.78, 0.86, 0.79 y 1 respectivamente. La única correlación positiva se da con el índice de tolerancia (IT) con 0.74. Para el indicador productividad media geométrica (PMG), se tiene una muy alta

correlación positiva con PM, ITE, MH con 1% y alta también con IR e IER con 0.99 y 0.78% respectivamente.

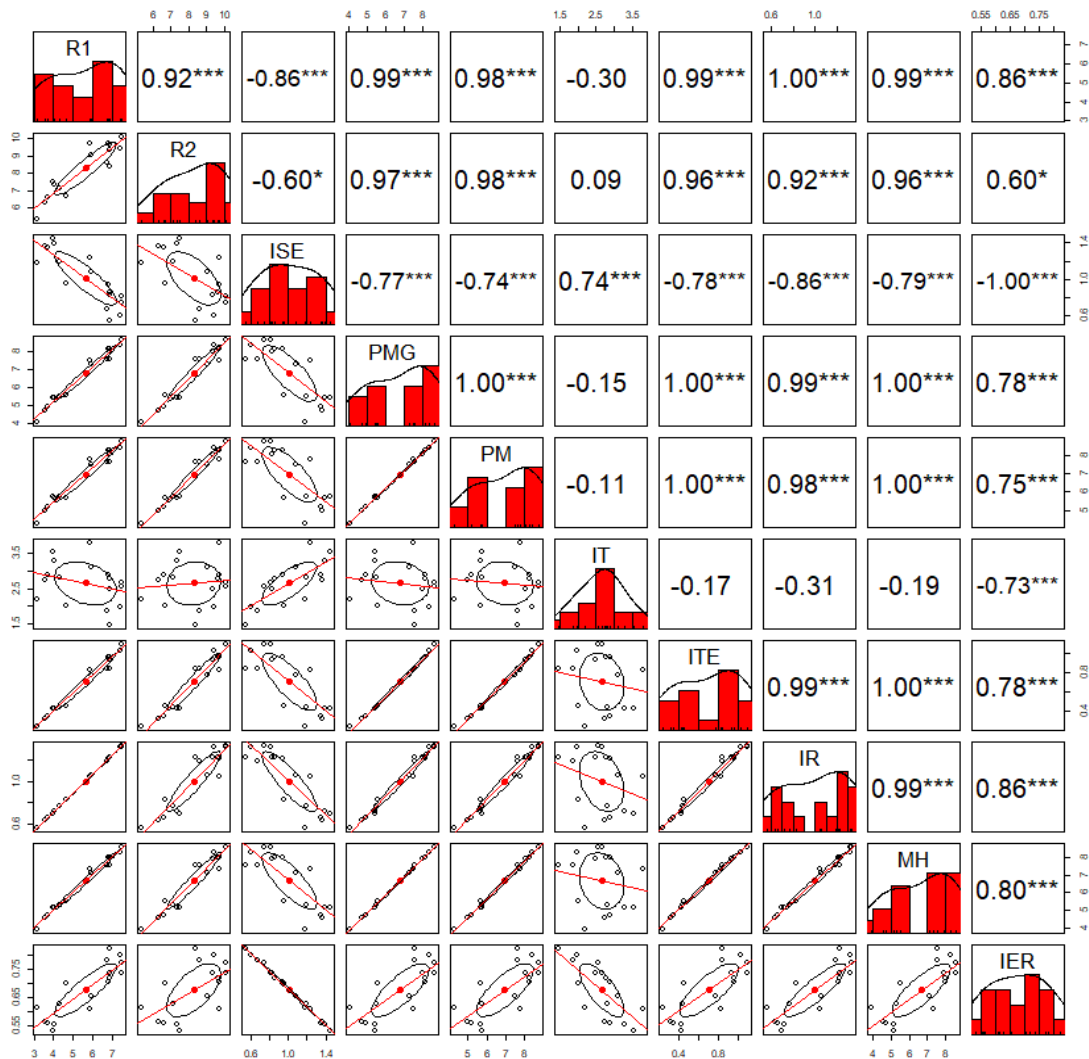


Figura 14: R1= Rendimiento de un genotipo en suelo inundado, R2= Rendimiento de un genotipo en suelo bajo déficit hídrico en fase vegetativa, ISE= Índice de susceptibilidad al estrés, PMG= Productividad media geométrica, PM= Productividad media, IT= Índice de tolerancia, ITE= Índice de tolerancia al estrés, IR= Índice de rendimiento, MH= Media armónica, IER= Índice de estabilidad de rendimiento

Existe correlación negativa baja solo con IT con 0.15%. En el caso del indicador productividad media (PM) tiene correlaciones muy altas con ITE y MH con 1%, altas con IR e IER con 0.98 y 0.75 respectivamente. A su vez, este indicador muestra correlación negativa baja con IT (0.11%). El indicador índice de tolerancia (IT) muestra correlación

negativa alta con IER (0.73%) y correlaciones negativas bajas con ITE, IR y MH con 0.17, 0.31 y 0.19 respectivamente. Para el indicador índice de tolerancia al estrés existen correlaciones positivas altas con IR, MH e IER con 0.99, 1 y 0,78% respectivamente. El indicador índice de rendimiento muestra correlaciones positivas altas con MH e IER con 0.99 y 0.86% respectivamente. Finalmente, el indicador MH mostró una correlación positiva alta con IER (0.80%).

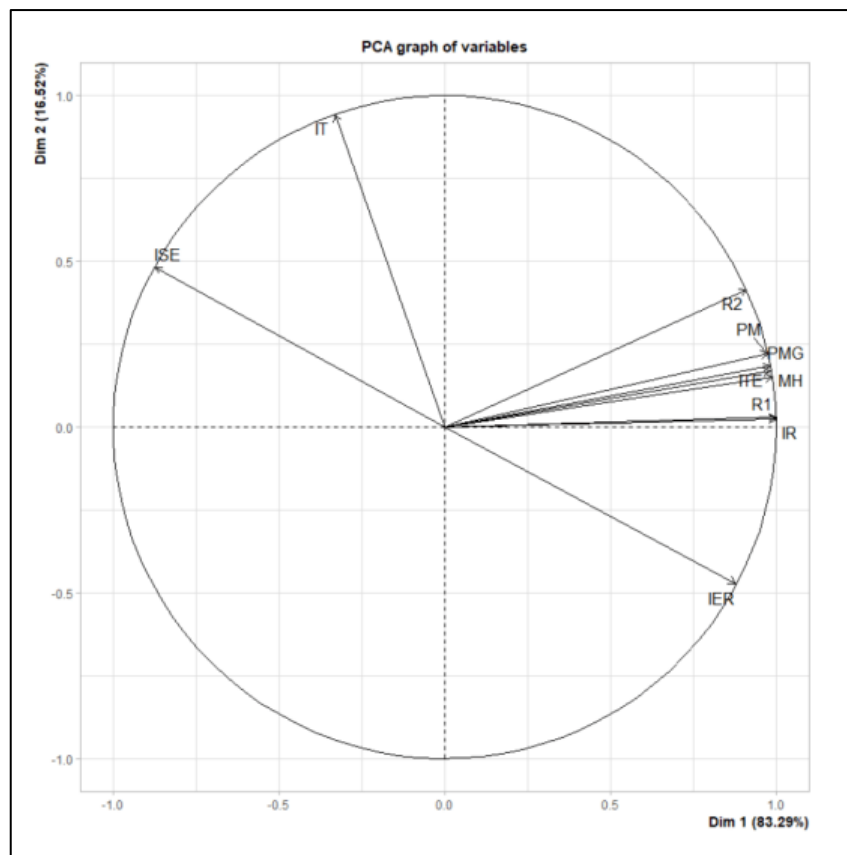


Figura 15: Análisis de componentes principales entre rendimiento en suelo inundado y bajo déficit hídrico en fase vegetativa e índices de selección

La correlación mostrada en la Figura 14 y el análisis de componentes principales (PCA) mostrado en la Figura 15, revelan conjuntamente que los índices de selección de estrés en el tratamiento de suelo bajo condiciones de déficit hídrico en fase vegetativa y el rendimiento de sus genotipos, indican que la productividad media geométrica (PMG), la productividad media (PM), media armónica (MH) e índice de tolerancia al estrés (ITE), son los índices adecuados para seleccionar los genotipos más estables al suelo en déficit hídrico en fase vegetativa.

4.7. ANÁLISIS CLUSTER DE LOS GENOTIPOS EN CONDICIONES DE SUELO INUNDADO Y SUELO EN DÉFICIT HÍDRICO EN FASE VEGETATIVA

En la Figura 16, se muestra el dendrograma, observándose que los genotipos se dispersan en dos grupos principales: los genotipos que presentan altos rendimientos en condiciones de suelo inundado y suelo en déficit hídrico en fase vegetativa y los que muestran baja respuesta y rendimiento bajo las condiciones estudiadas. Los genotipos superiores con rendimientos más altos fueron: TP 30598, TP 30758, TP 2677, TP 24172, TP 30602 y TP 30755. Los genotipos TP 26717 IR-71706, Sahood Ulan 1 y TP 30757, tienen rendimientos aceptables en ambos tratamientos. Finalmente, los genotipos Tinajones, IR-43, Mallares, La Esperanza, Fortaleza, Vandana, La Puntilla y Vandana son los que muestran rendimientos más inestables.

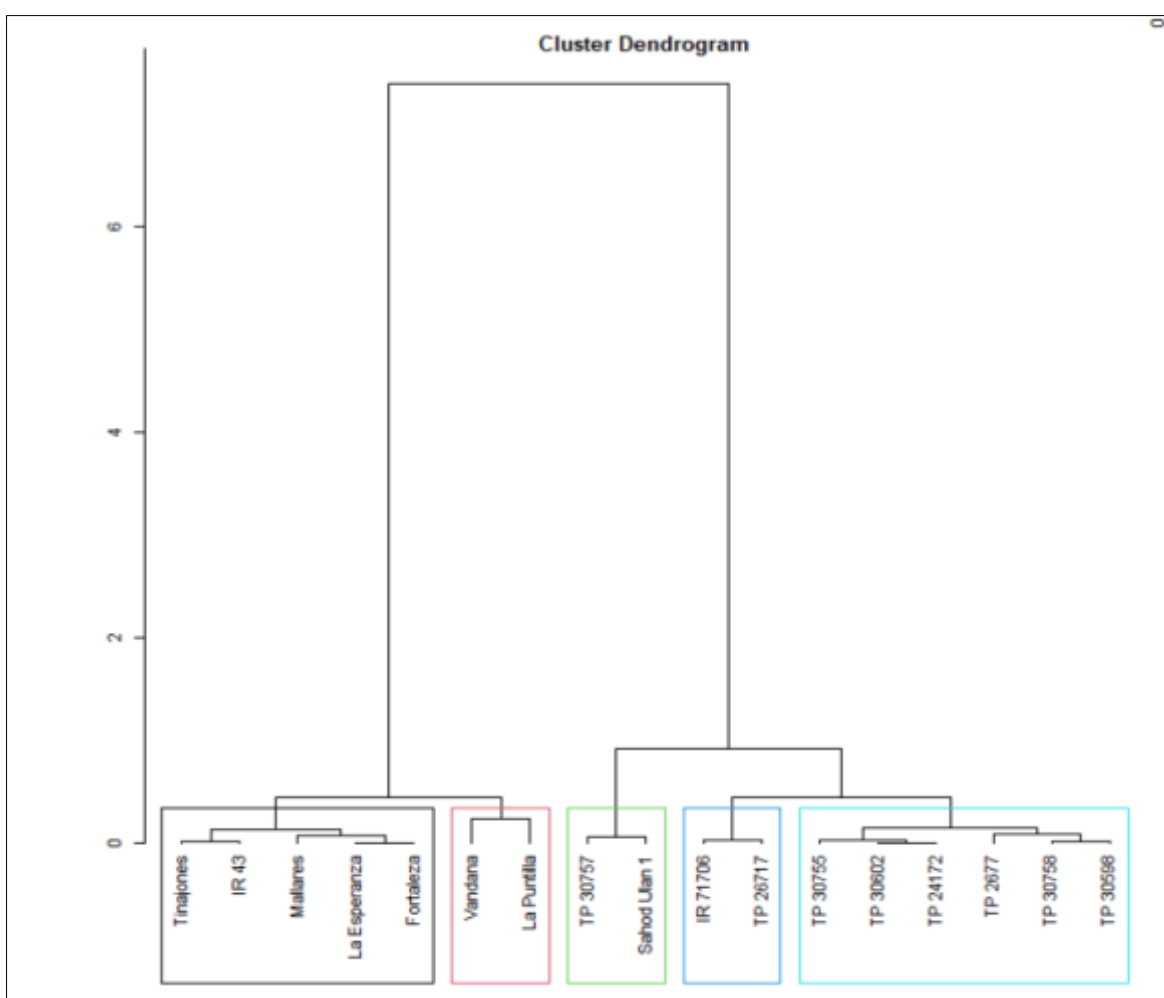


Figura 16: Dendrograma de análisis cluster de genotipos basados en índices de selección y rendimiento de grano bajo suelo inundado y suelo en déficit hídrico en fase vegetativa

4.8. ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL DE LOS GENOTIPOS CON ADAPTACIÓN A SUELO INUNDADO Y SUELO EN DÉFICIT HÍDRICO EN FASE VEGETATIVA

En la Figura 17, el gráfico tridimensional del índice de productividad media geométrica (PMG) selecciona a los genotipos 12 (TP 30758) y 13 (TP 30598), con el potencial de adaptación más alto al manejo de suelo inundado y suelo en déficit hídrico en fase vegetativa. Asimismo, los genotipos 1 (TP 2677), 5 (TP 30602), 9 (TP 24172) y 8 (TP 30755), mantienen un buen rendimiento en los dos ambientes. Los genotipos 6 (Fortaleza) y 7 (La Esperanza), tuvieron menor adaptación al déficit hídrico. El genotipo 14 (Vandana) fue el de más baja respuesta de adaptación a las condiciones de manejo de riego estudiadas.

Del mismo modo, el gráfico de productividad media (PM), selecciona a los mismos genotipos, 12 (TP 30758) y 13 (TP 30598), como los de mejor adaptación al manejo de suelo inundado y de déficit hídrico en fase vegetativa y al genotipo 14 (Vandana) como el de más baja respuesta. Los gráficos de productividad media armónica (MH) y del índice de tolerancia al estrés (ITE) seleccionan a los mismos genotipos 12 (TP 30758) y 13 (TP 30598), con la mejor respuesta a los manejos de agua.

En esta investigación, los rendimientos alcanzados en el suelo manejado en déficit hídrico en fase vegetativa, disminuyó en promedio 32% del rendimiento de grano frente a los genotipos manejados en suelo inundado. Thiyagarajan *et al.* (2002), afirman que, si se mantiene el suelo en saturación, el consumo de agua puede reducirse hasta en un 50% sin que se afecte el rendimiento de grano. Los estudios realizados en Asia toman en cuenta también a la napa freática como un aporte de agua adicional para el manejo del cultivo de arroz, al tener la napa cerca de la superficie, permite ahorrar un mayor porcentaje de agua de riego porque las raíces de las plantas absorben esa humedad y por ello se puede disminuir el aporte de agua en el riego. En este estudio, se tuvo mediciones de la napa freática y esta se mantuvo entre 71 y 81 cm por debajo del suelo influyendo en la respuesta de los rendimientos de los genotipos manejados en déficit hídrico en fase vegetativa.

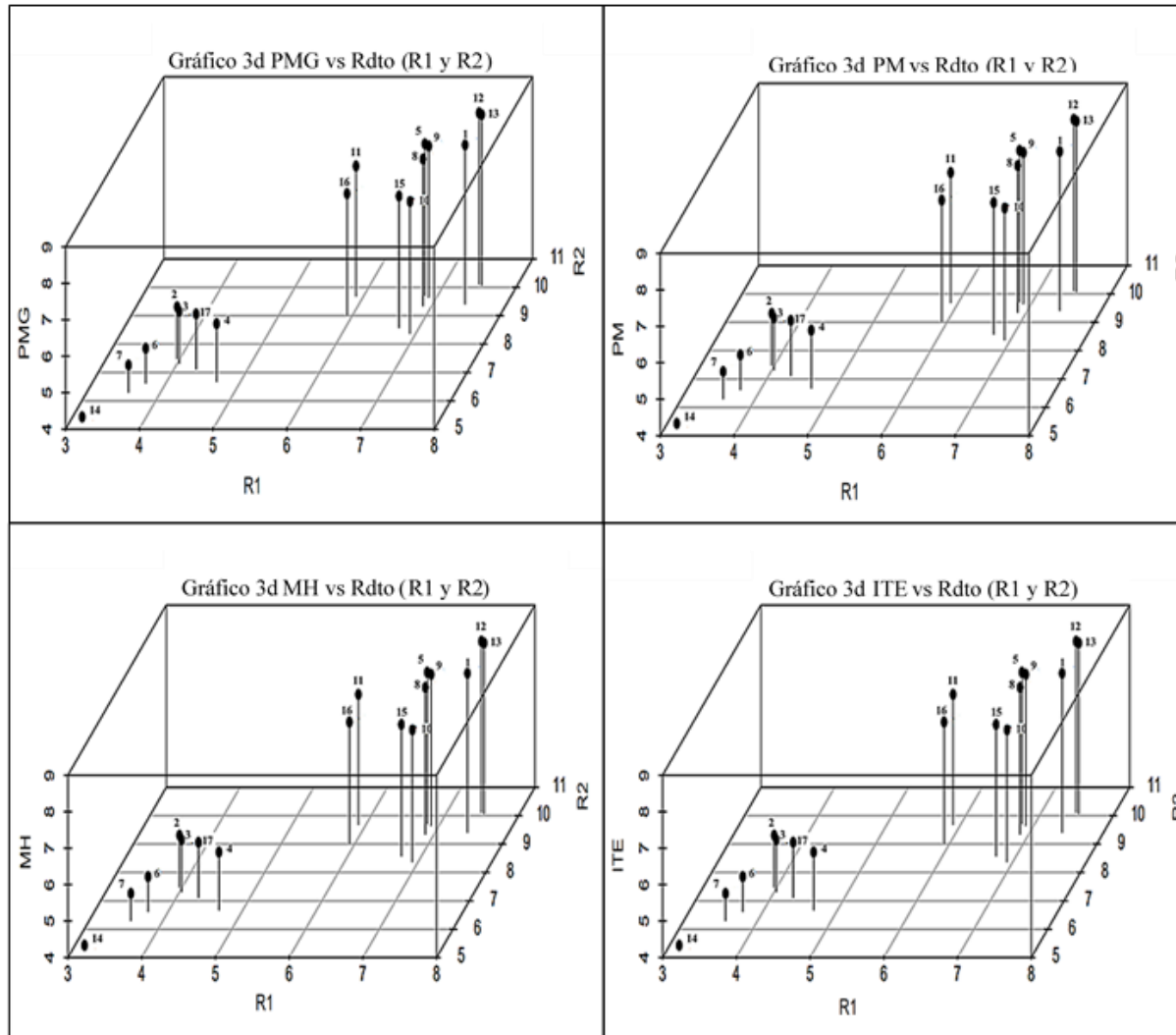


Figura 17: Gráficos tridimensionales de rendimientos de genotipos manejados en condiciones de suelo inundado (R1) y suelo en déficit hídrico en fase vegetativa (R2) con los índices de selección: Productividad media geométrica (PMG), Productividad media (PM), Media armónica (MH) e Índice de tolerancia al estrés (ITE)

Los rendimientos de los genotipos manejados en suelo con déficit hídrico en fase vegetativa, generan una menor producción de biomasa afectando así el rendimiento de grano. El número de macollos en ambientes inundados son mayores, pero el desarrollo de los granos disminuye ya que presentan un mayor número de granos vanos. Por este motivo, las características genotípicas influyen en la adaptación a los sistemas de sequía.

4.9. CALIDAD MOLINERA

En la Tabla 28, la prueba Tukey de comparación de medias, nos muestra que el porcentaje de granos enteros (%) entre ambos tratamientos presentan diferencias significativas. El tratamiento T1 de suelo inundado alcanzó valores de 60.12% frente al 54.84% del tratamiento T2 de suelo manejado en déficit hídrico en fase vegetativa.

Tabla 28: Porcentaje de granos enteros (%) en dos sistemas de manejo de agua

Tratamiento	Porcentaje de granos enteros (%)	Significancia*
Suelo Inundado (T1)	60.12	a
Suelo en déficit hídrico (T2)	54.84	b

*Los valores promedio con una misma letra, no son significativamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey al 0.05%.

En la Tabla 29, se observa que el rendimiento de molinería entre genotipos manejados en el sistema de inundación, tuvo diferencias significativas según la prueba Tukey. Siendo el genotipo IR 71706 el resultado más alto con 66.47%, seguido de los genotipos TP 30758 (65.36%), Vandana (65,30%) y TP 30598 (64.8%). Los genotipos TP 24172 (54.78%), TP 30755 (54.14%) y por los cultivares comerciales Fortaleza (53.39%) y La Puntilla (52.61%) mostraron los menores valores.

Tabla 29: Prueba de Tukey para rendimiento de molinería en manejo de riego inundado

Genotipo	Promedio de granos enteros (%)	Significancia*
IR-71706	66.47	a
TP 30758	65.36	ab
Vandana	65.3	ab
TP 30598	64.8	abc
La Esperanza	63.96	abcd
Sahood Ulan 1	61.94	abcd

«Continuación»

TP 26717	61.27	abcd
Tinajones	60.76	abcd
IR-43	60.07	abcd
TP 2677	60.02	abcd
TP 30757	59.85	abcd
TP 30602	58.98	abcd
Mallares	58.27	abcd
TP 24172	54.78	bcd
TP 30755	54.14	bcd
Fortaleza	53.39	cd
La Puntilla	52.61	d

*Los valores promedio con una misma letra, no son significativamente diferentes entre sí.

Carrizo *et al.* (2017) indican que el manejo del suelo inundado tiene efectos negativos sobre la calidad del grano de arroz, ya que tiene mayor tendencia a la acumulación de metales pesados nocivos como el arsénico y el mercurio que los granos producidos bajo la tecnología AWD. Otro beneficio que indican es que la implementación del riego AWD mejora la calidad de grano al aumentar el contenido de proteínas, además de mejorar el rendimiento de granos. Este efecto se ve menguado si la tecnología AWD es de manera severa.

Ishfaq *et al.* (2020) señalan que el manejo del riego AWD disminuyó la cantidad de granos opacos en un 62%, en un 51% los granos vanos y los granos tiza en un 42%.

En la Tabla 30, se aprecia que en el tratamiento T1, el genotipo IR 71706 obtuvo el mayor rendimiento de molinería (66%), seguido por los genotipos TP 30758 (63.39%), TP 30598 (62.37%) y Vandana (60,99%). Los genotipos TP 30602 (52.73%), La Puntilla (52%), TP 24172 (44.89%) y TP 30755 (42.25%) presentaron los menores valores.

Tabla 30: Prueba de Tukey para rendimiento de molinería en condiciones de déficit hídrico en fase vegetativa

Genotipo	Promedio de granos enteros (%)	Significancia*
IR-71706	66.01	a
TP 30758	63.39	ab
TP 30598	62.37	abc
Vandana	60.99	abc
TP 26717	57.93	abc
Tinajones	54.78	abc

«Continuación»

Sahood Ulan 1	54.56	abc
TP 30757	53.97	abc
TP 2677	53.92	abc
Mallares	53.61	abc
La Esperanza	53.08	abc
Fortaleza	52.93	abc
IR-43	52.93	abc
TP 30602	52.73	abc
La Puntilla	52.01	abc
TP 24172	44.89	bc
TP 30755	42.25	c

*Los valores promedio con una misma letra, no son significativamente diferentes entre sí.

Cabe mencionar que los dos genotipos TP 30758 y TP 30598 mejor adaptados en los dos ambientes, según los valores de índices de selección, muestran los mejores rendimientos de molinería.

V. CONCLUSIONES

- Los genotipos TP 30758 y TP 30598 fueron los que mayor adaptación al manejo de suelo inundado y suelo en déficit hídrico en fase vegetativa, y alcanzaron rendimientos de 8.80 t. ha⁻¹ en los dos ambientes.
- En las condiciones en que se ejecutó el estudio, durante el periodo de déficit, la profundidad de la napa freática fluctuó de 70 – 80 cm. Considerando este comportamiento, la tecnología AWD para aplicarse, debe variar de un estrés leve a un estrés ligeramente intermedio.
- Los índices de productividad media geométrica, productividad media, media armónica e índice de tolerancia al estrés, identificaron a los genotipos TP 30758 y TP 30598, como los más adaptados a las condiciones de inundación y déficit hídrico.
- La calidad molinera fue afectada por el manejo de riego, los genotipos en condiciones de suelo inundado, alcanzaron el 60% de rendimiento de molinería, en comparación que cuando fueron manejados en déficit hídrico, que obtuvieron 55%.

VI. RECOMENDACIONES

- Profundizar los estudios de la aplicación de la tecnología AWD en distintas localidades arroceras del Perú en interacción con el manejo de fertilizantes.
- Realizar ensayos en áreas con diferentes profundidades de la napa freática, para establecer la duración de los periodos de secas moderadas, para no afectar los rendimientos.
- Desarrollar cultivares precoces, tolerantes al déficit hídrico, como una medida de adaptación al cambio climático.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Asch, M., Barbosa, P., Dynia, J. Fageria, N. & Zinco, K. (2005). Toxicity in rice – conditions and management concepts. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 168, 558 – 573, 2005. doi:10.1002/jpln.200520504.
- Belder, P., Bouman, B., Cabangon, R., Lu, G., Quilang, E., Li, Y., Spiertz, J. & Tuong, T. (2004). Effect of water-saving irrigation on rice yield and water use in typical lowland conditions in Asia. *Agricultural Water Management*, 65:193-210.
- Bouman, B., Humphreys, E., Tuong, T. & Barker, R. (2006). Rice and water. *Advances in Agronomy*, 92:137-163.
- Bouman, B.A., Humphreys, E., Tuong, T.P. & Barker, R. (2001). Rice and water. *Advances in agronomy*, 92, 123-210.
- Bueno, M., Di Sapio, O., Barolo, M., Busilacchi, H., Quiroga, M. & Severin, C. (2010). Water productivity of contrasting rice genotypes grown under water-saving conditions in the tropics and investigation of morphological traits for adaptation. *Agricultural Water Management*, 98:241-250
- Bunnag, S. & Pongthai, P. (2013) Selection of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars tolerant to drought stress in the vegetative stage under field conditions. *American Journal of Plant Sciences*, 4, 1701-1708. <http://dx.doi.org/10.4236/ajps.2013.49207>
- Carrijo, D.R., Lundy, M.E., & Linqvist, B.A. (2017). Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 203, 173-180.
- Darvishzadeh, R., Pirzad, A., Hatami-Maleki, H., Poormohammad-Kiani, S., Sarrafi, A. (2010). Evaluation of the reaction of sunflower inbred lines and their F1 hybrids to drought conditions using various stress tolerance indices. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8:1037-1046.
- Dingkuhn, M. & Asch, F. (1999). Physiological responses of *Oryza sativa*, *O. glaberrima* and interspecific rice cultivars in a toposequence in West Africa. *Euphytic* 110, 109–126.

- Farooq, M., Wahid, A., Lee, D.J. y Siddique, K. (2009). Avances en la resistencia a la sequía del arroz. *Rev. Sci.* 28: 199–217.
- García, A. y Rodes, R. (2009). Efectos fisiológicos del déficit hídrico inducido en fases tempranas del crecimiento de plantas de arroz (*Oryza sativa* L.) y su aplicación en la selección de variedades tolerantes. *Agris International* 98, 349-354
- González, Y., Ruíz, M. y Muñoz, Y. (2016). Suspensión de la lámina de agua en el arroz (*Oryza sativa* L.) por trasplante. *Avances*, 18: 19-27. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=538145>
- Heros Aguilar, E. (2019). *Alternativas tecnológicas para contribuir a la sustentabilidad del cultivo de arroz (Oryza sativa L.) en el Perú* (Tesis Doctorado). Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 204 p.
- Heros, E. (2012). *Manual Técnico de Manejo Integrado del arroz*. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. p. 33 – 34.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.
- Ishfaq, M., Farooq, M., Zulfiqar, U., Hussain, S., Akbar, N., Nawaz, A. & Anjum, S. A. (2020). Alternate wetting and drying: A water-saving and ecofriendly rice production system. *Agricultural Water Management*, 106363. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106363
- Kato, Y., Okami, M. & Katsura, K. (2009). Yield potential and water use efficiency of anaerobic rice (*Oryza sativa* L.) in Japan. *Field Crop Research*, 113(3), 328-334.
- Kumar, J. & Abbo, S. (2001). Genetics of flowering time in chickpea and its influence on productivity in semiarid environments. *Adv. Agrón.* 72, 107–138.
- Lafitte, R., Courtois, B., Arraudeau, M. (2002). Genetic improvement of rice in aerobic systems: progress from yield to genes. *Field Crop Research* 75: 171-190.
- Liu, L., Chen, T., Wang, Z., Zhang, H., Yang, J. & Zhang, J. (2013). Combination of site-specific nitrogen management and alternate wetting and drying irrigation increases grain yield and nitrogen and water use efficiency in super rice. *Field Crops Research*, 154, 226-235. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.08.016>
- Martin, E. (2017). Métodos para medir la humedad del suelo para la programación del riego. The University of Arizona. Tucson, Arizona. 8 p. Recuperado de <https://extension.arizona.edu/sites/extension.arizona.edu/files/pubs/az1220s->

- Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI). (2018). Series históricas de producción agrícola- Compendio estadístico. Recuperado de <https://siea.midagri.gob.pe/portal/publicacion/boletines-anuales/4-agricola>
- Mostajeran, A. y Rahimi-Eichi, V. (2009). Effects of drought stress on the growth and yield of rice cultivars (*Oryza sativa* L.) and accumulation of proline and soluble sugars in sheath leaves and blades of different ages. *Journal American-Eurasiática of Ciencias Agrícolas and Ambientales*, 5,264-272.
- Muthurajan, R. & Sadat, S. (2011). Physiological and Proteomic Responses of Rice Peduncles to Drought Stress. *Mol Biotechnol*, 48: 173 - 182.
- Nelson, A., Wassmann, R., Lijadora, B.O., Palao, L.K. (2015). Climate-determined suitability of “alternative wet and dry” water-saving technology in rice systems: a scalable methodology demonstrated for a province in the Philippines. *More one*, 10: 107-143.
- Oliver, M. (2008). Alternate wetting and drying irrigation for rice cultivation. *J. Bangladesh Agril. University*. 6(2): 409-414.
- Polón, R. y Castro, R. (1999). Aplicación del estrés hídrico como alternativa para incrementar el rendimiento en el cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.). *Cultivos Tropicales*, 3: 37 - 39.
- Silalertruksa, T., Gheewala, S.H., Mungkung, R., Nilsalab, P., Lecksiwilai, N., Sawaengsak, W. (2017). Implicaciones del uso del agua y la huella de escasez de agua para el cultivo sostenible del arroz. *Bangkok, Tailandia*. 32: 132-167.
- Sistema Integrado de Estadística Agraria. (2022). *Perfil Productivo y Regional*. Recuperado de https://siea.midagri.gob.pe/portal/siea_bi/index.html
- Strasburger, E. (1986). *Botánica* (7ma ed.). Barcelona, España: Martin S.A. 1098 p.
- Thiyagarajan, T., Senthilkumar, K., Bindraban, P., Hengsdijk, H., Ramasamy, S. Velu, V., Durgadevi, D., Govindarajan, K., Priyadarshini, R., Sudhalakshmi, C., Nisha, P.T. & Gayathry, C. (2002). Crop management options for increasing water productivity in rice. *Journal of Agriculture Resource management*, 1(4), 169-181.
- Yang, J., Zhou, Q. & Zhang, J. (2017). Moderate wetting and drying increases rice yield and reduces water use, grain arsenic level, and methane emission. *Crop J.* 5, 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2016.06.002>.
- Yao, F., Huang, J., Cui, K., Nie, L., Xiang, J., Liu, X., ... & Peng, S. (2012). Agronomic performance of high-yielding rice variety grown under alternate wetting and drying

irrigation. *Field crops research*, 126, 16-22.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.09.018>

Zhang, H., Xue, Y., Wang, Z., Yang, J. & Zhang, J. (2008). An alternate wetting and moderate soil drying regime improves root and shoot growth in rice. *Crop Sci.* 49, 2246–2260. <https://doi.org/10.2135/cropsci2009.02.0099>.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Análisis físico – químico del suelo

pH (1:1)	CE (1:1) ds/m	CaCO ₃ %	M.O %	P ppm	K ppm	Análisis mecánico			Clase textural
						Arena %	Limo %	Arcilla %	
7.96	0.62	5.70	1.10	16	441	28	36	36	Franco arcilloso

Cationes cambiables (meq/100g)						Suma de cationes	Suma de bases	Saturación de bases %
CIC	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺³ + H ⁺			
27.52	23.61	3.02	0.67	0.22	0.00	27.52	27.52	100

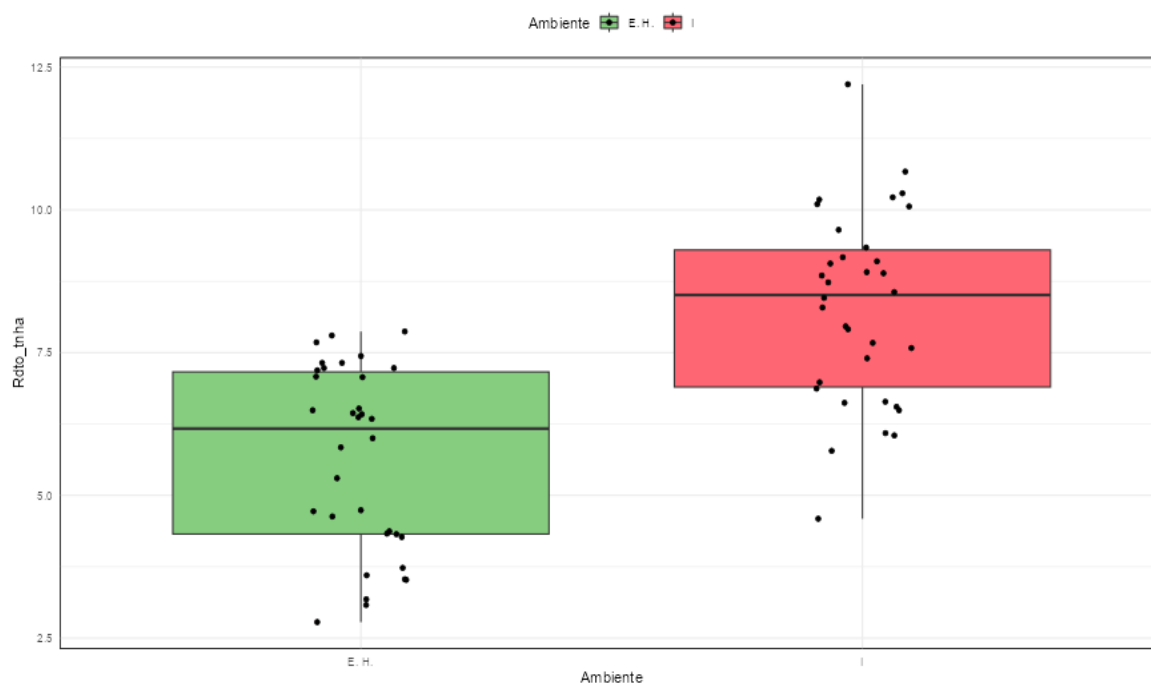
FUENTE: Adaptado del Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes (LASPAF).

Anexo 2: ANOVA para la variable rendimiento (t. ha⁻¹)

Rendimiento (t. ha ⁻¹)					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Genotipo	146.693	16	9.168	14.755	***
Ambiente	119.542	1	119.542	192.380	***
Residuos	31.069	50	0.621		
Total	297.304	67			

CV = 23.56%

Variable Distribution

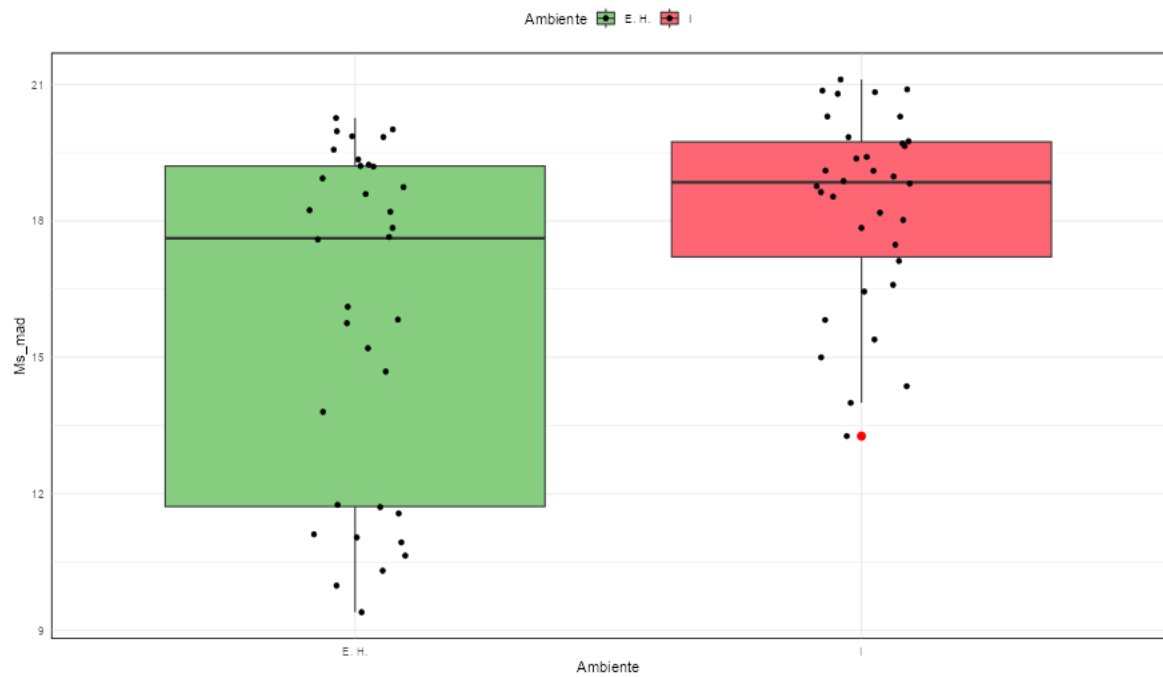


Anexo 3: ANOVA para la variable acumulación de biomasa (t. ha⁻¹)

Biomasa a la Maduración (t. ha ⁻¹)					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Genotipo	460.40	16	28.775	10.087	***
Ambiente	96.50	1	96.497	33.827	***
Residuos	142.63	50	2.853		
Total	699.53	67			

CV = 9.86%

Variable Distribution

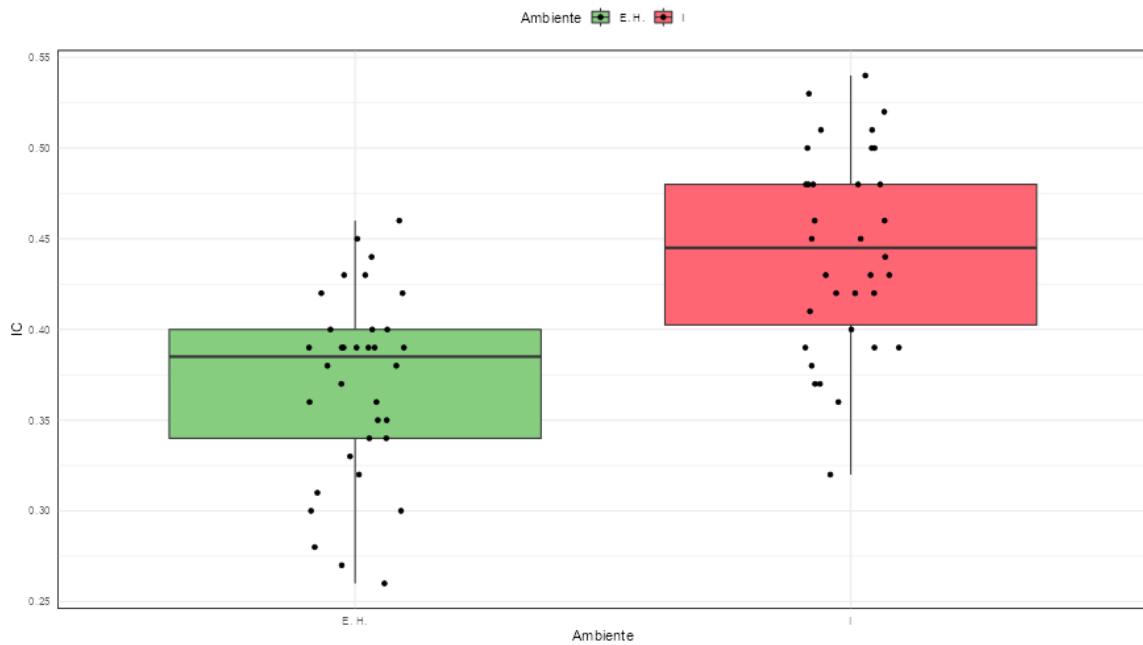


Anexo 4: ANOVA para la variable índice de cosecha (%)

Índice de cosecha (%)					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Genotipo	0.0513	16	0.0032	1.180	**
Ambiente	0.0934	1	0.0933	34.394	***
Residuos	0.1358	50	0.0027		
Total	0.2805	67			

CV = 12.80%

Variable Distribution

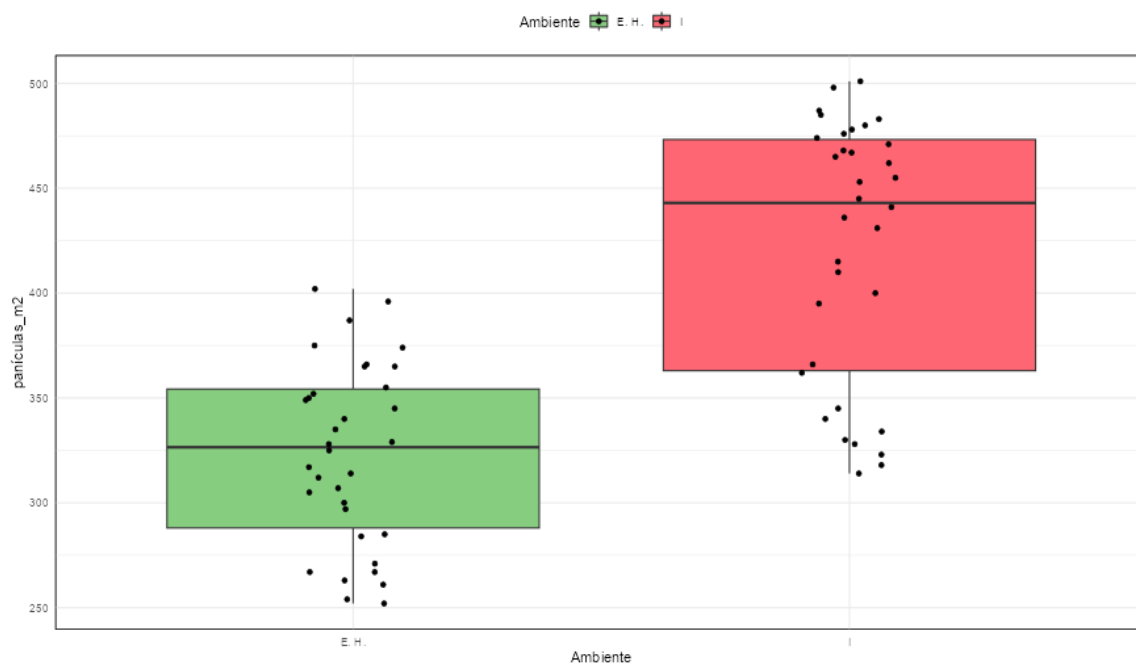


Anexo 5: ANOVA para la variable número de panículas por metro cuadrado

Número de panículas por metro cuadrado					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Genotipo	156 754	16	9797	15.107	***
Ambiente	164 249	1	164 249	253.260	***
Residuos	32 427	50	649		
Total	353 430	67			

CV = 6.84%

Variable Distribution

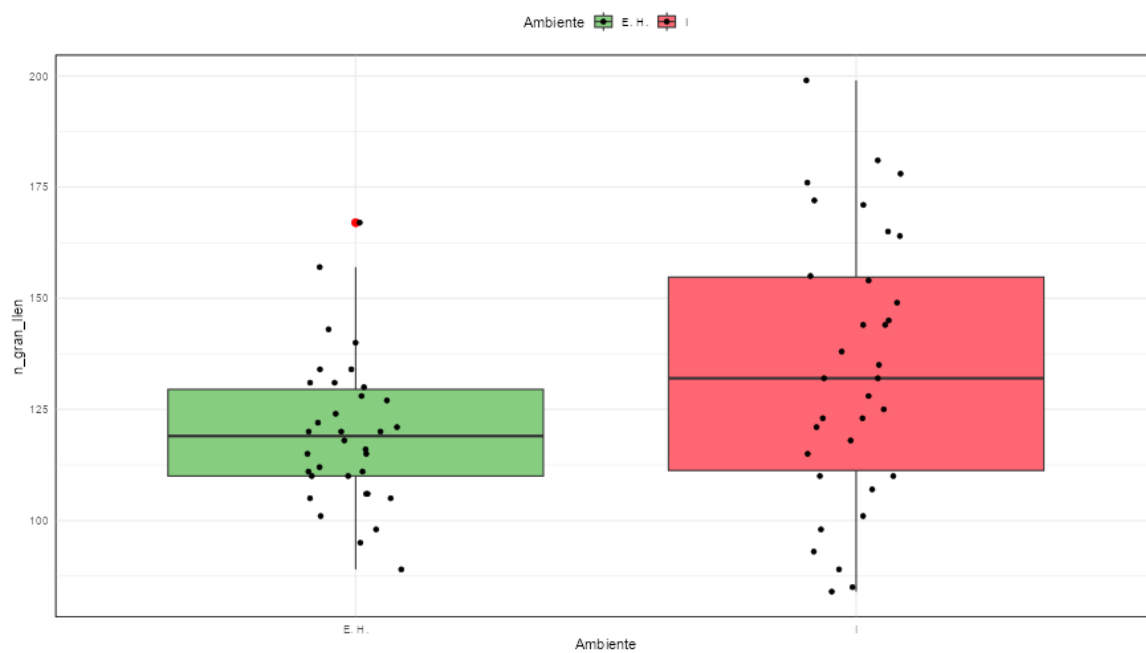


Anexo 6: ANOVA para la variable número de granos llenos por panícula

Número de granos llenos por panícula					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Genotipo	22 398.5	16	1399.9	4.1223	***
Ambiente	3 559.8	1	3559.8	10.4824	**
Residuos	16 979.7	50	339.6		
Total	42 938	67			

CV = 14.51%

Variable Distribution

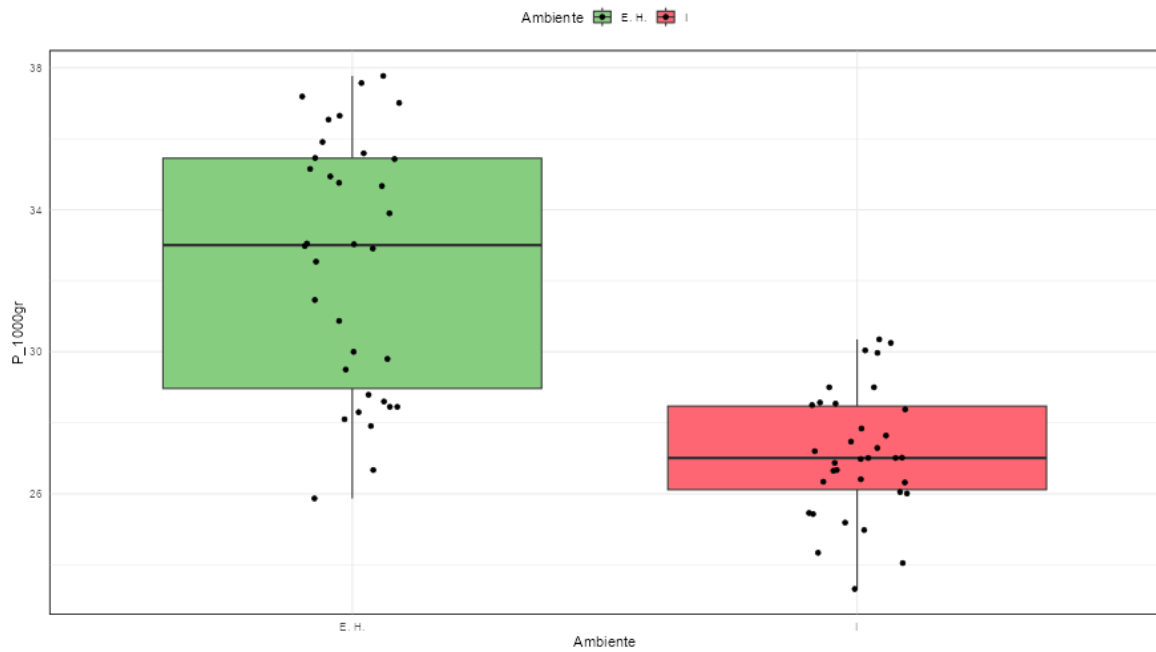


Anexo 7: ANOVA para la variable peso de 1000 granos (g)

Número de Peso de 1000 granos (g)					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Genotipo	345.35	16	21.58	6.1671	***
Ambiente	496.10	1	496.10	141.7431	***
Residuos	175.00	50	3.50		
Total	1016.45	67			

CV = 6.27 %

Variable Distribution

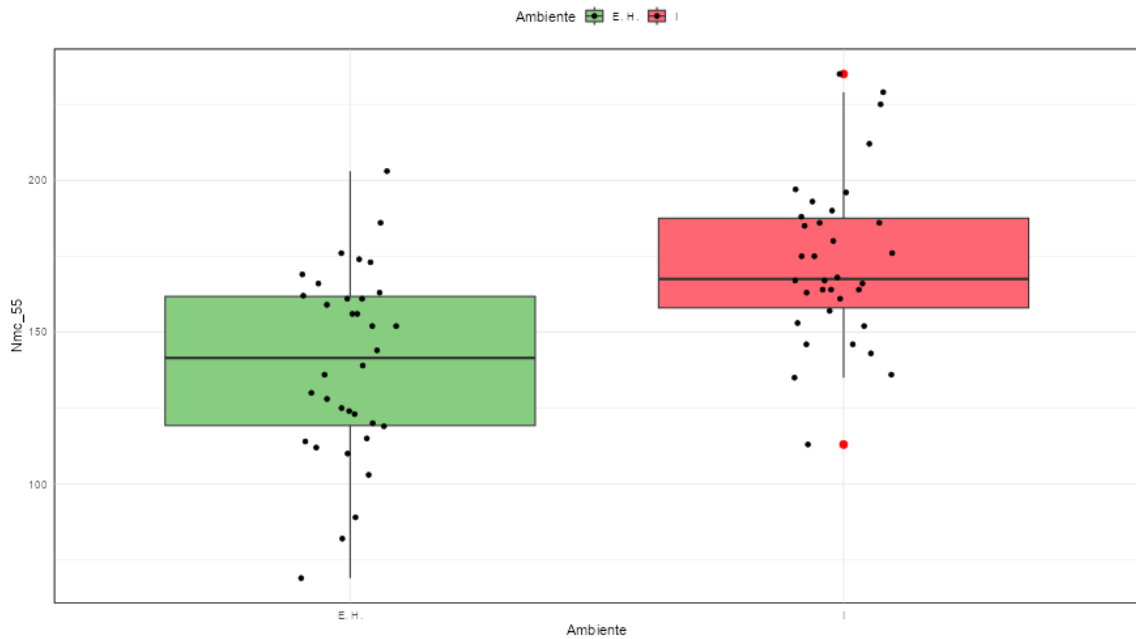


Anexo 8: ANOVA para la variable número de macollos por metro cuadrado

Número de macollos por metro cuadrado a los 55 días					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Genotipo	18 146	16	1134.2	1.5095	*
Ambiente	19 179	1	19 178.9	25.5258	***
Residuos	37 568	50	751.4		
Total	74 893	67			

CV= 17.51 %

Variable Distribution

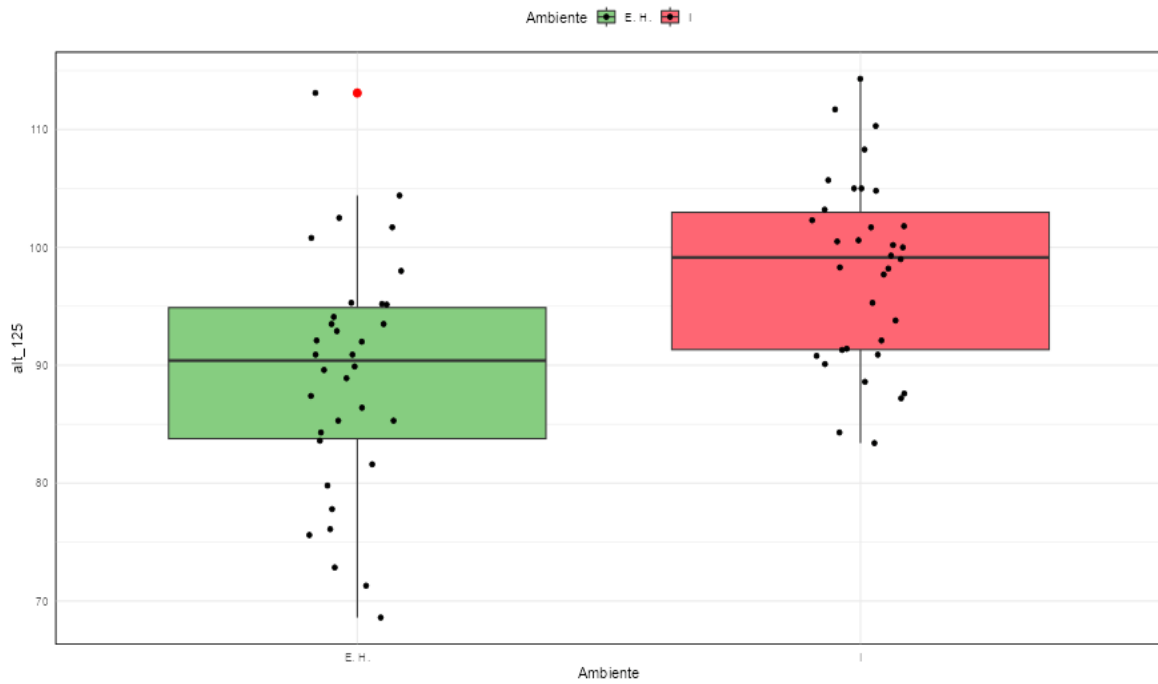


Anexo 9: ANOVA para la variable altura de planta (cm)

Altura de planta a los 125 días (cm)					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Genotipo	4434.2	16	277.14	15.395	***
Ambiente	1361.7	1	1361.74	75.646	***
Residuos	50	50	18		
Total	5845.9	67			

CV = 4.53 %

Variable Distribution

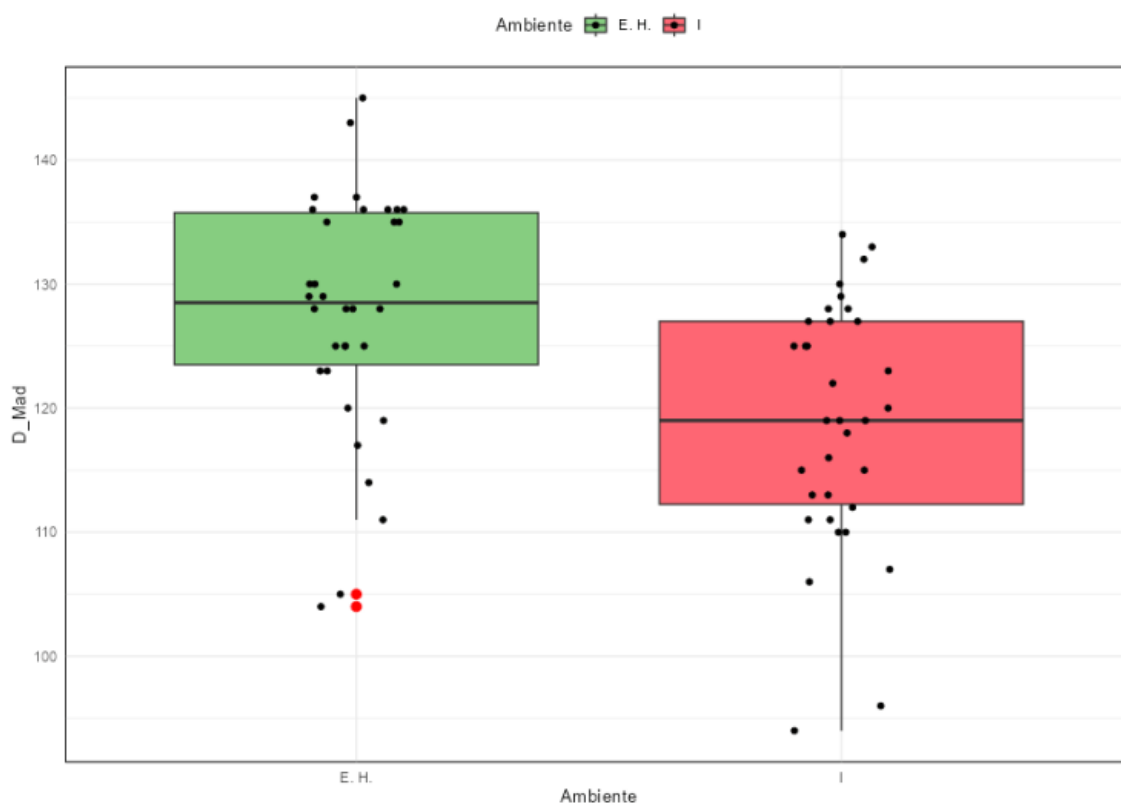


Anexo 10: ANOVA para periodos de maduración (Días)

Periodos de Maduración (Días)					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Genotipo	5654.2	16	353.39	26.774	***
Ambiente	1359.1	1	1359.06	102.968	***
Residuos	659.9	50	13.20		
Total	7673.2	67			

CV = 2.95 %

Variable Distribution

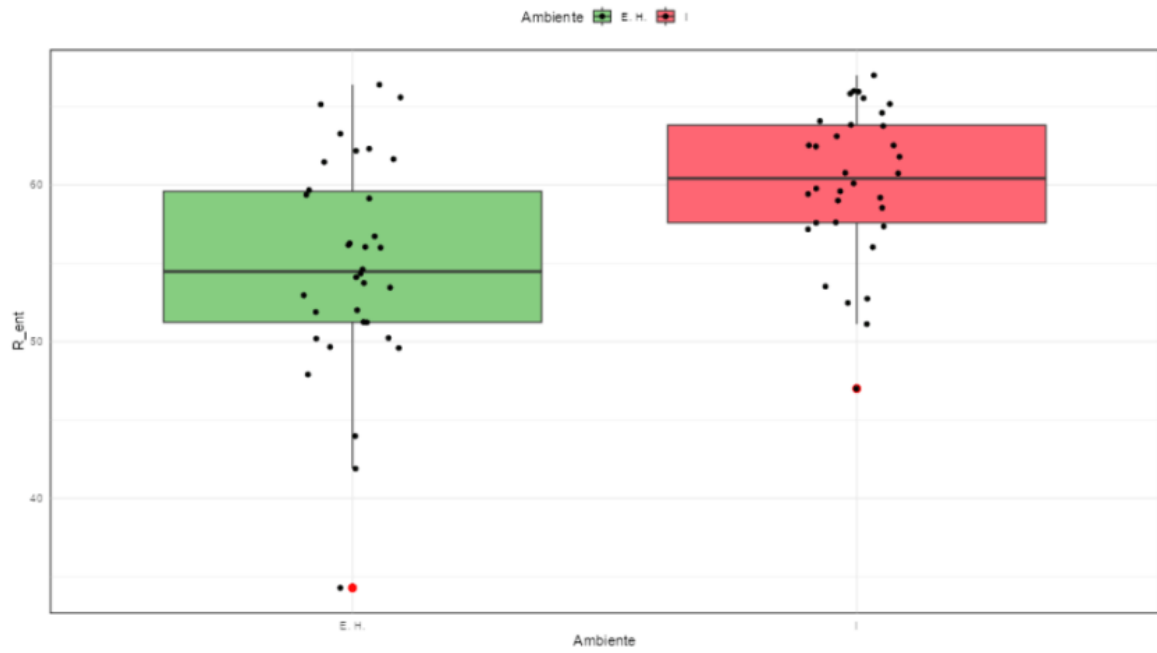


Anexo 11: ANOVA para calidad molinera (%)

Porcentaje de granos enteros (%)					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Genotipo	1585.50	16	99.09	6.399	***
Ambiente	472.56	1	472.56	30.516	***
Residuos	774.29	50	15.49		
Total	2 832.35	67			

CV = 6.85 %

Variable Distribution



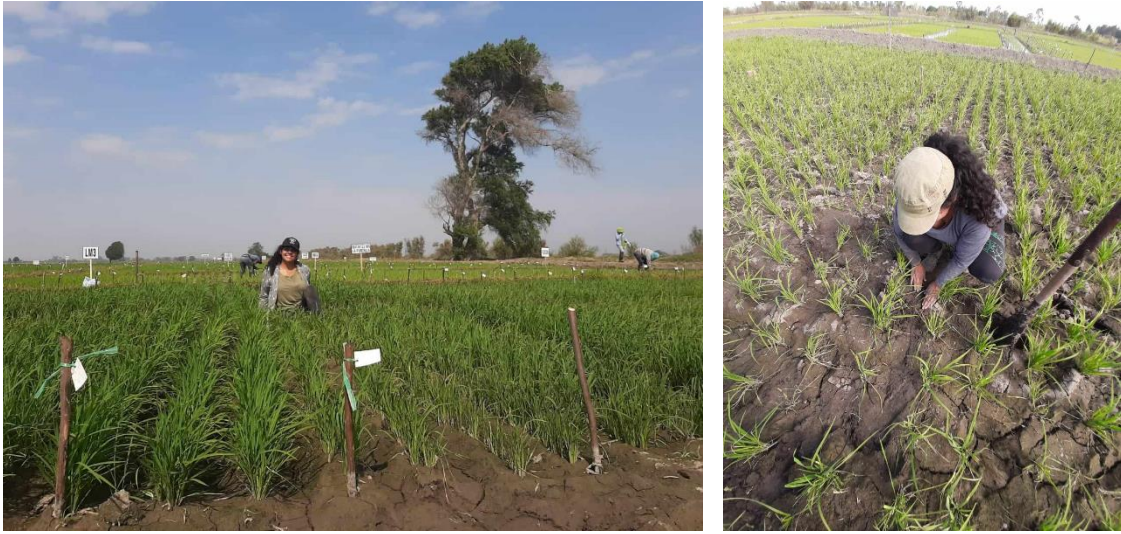
Anexo 12. Proyecto FONTAGRO – Más arroz con menos emisiones y con menor consumo de agua



Anexo 13: Medición de humedad gravimétrica del suelo y de la napa freática



Anexo 14: Medición de altura de planta y conteo de macollos



Anexo 15: Medición de humedad gravimétrica del suelo con sensores Watermark



Anexo 16: Medición de humedad gravimétrica del suelo con TDR



Anexo 17: Área experimental de inundación y de déficit hídrico en fase vegetativa

