

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**EFFECTO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN ARROZ Y USO DE HERRAMIENTAS DE
DETECCIÓN REMOTA PARA ESTIMACIÓN DE RENDIMIENTO**

POR

CRISTIAN FELIPE HERRERA VILLABLANCA

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

CHILLÁN – CHILLE

2025

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EFFECTO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN ARROZ Y USO DE HERRAMIENTAS DE
DETECCIÓN REMOTA PARA ESTIMACIÓN DE RENDIMIENTO**

POR

CRISTIAN FELIPE HERRERA VILLABLANCA

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

CHILLÁN – CHILLE

2025

Aprobada por:

Profesor Asistente, Miguel Garriga C.
Lic. Biología, M. Sc., Dr.

Guía

Profesor Asociado, Marcelo Doussolin G.
Ing. Agrónomo, M. Sc., Dr.

Asesor

Investigadora, Karla Cordero L.
Ing. Agrónomo, Dr. Cs.
INIA Quilamapu

Asesor externo

Profesor Asociado, Guillermo Wells M.
Ing. Agrónomo, M. Cs.

Decano

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Resumen	1
Summary	2
Introducción	2
Materiales y Métodos	6
Resultados y Discusión	8
Conclusiones	22
Referencias	23
Apéndices	28

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

		Página
Figura 1	Análisis de Componentes Principales (PCA) de rasgos agronómicos, productivos y de calidad de 20 genotipos de arroz cultivados bajo condiciones de estrés hídrico durante dos temporadas.....	18
Figura 2	Análisis de Correlación de Pearson entre variables agronómicas, productivas y de calidad obtenidas en genotipos de arroz cultivados bajo condiciones de estrés hídrico durante dos temporadas.....	20
Tabla 1	Genotipos de arroz a evaluados, Zafiro-INIA es usado como control, Sandora y Dunghan Shali son variedades comerciales y los restantes genotipos son líneas avanzadas desarrolladas por el Programa de mejoramiento genético de arroz del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) de Chile.....	6
Tabla 2	Análisis de varianza de días de floración (DF), altura de la planta (AP), rendimiento de grano (RG) y porcentaje de grano entero (PGE) evaluados en 20 genotipos de arroz en dos temporadas.....	9
Tabla 3	Análisis de varianza del largo de panícula (LP), peso de mil granos con cáscara (PMGC), peso de mil granos pulidos (PMGP) evaluados en 20 genotipos de arroz en dos temporadas.....	11
Tabla 4	Análisis de varianza de número de granos totales por panícula (NGT/P), número de granos llenos por panícula (NGLL/P) y porcentaje de esterilidad de la planta (PE) evaluados en 20 genotipos de arroz en dos temporadas.....	13
Tabla 5	Análisis de varianza del largo del grano (L), ancho del grano (A) y relación de largo/ancho del grano (L/A) evaluados en 20 genotipos de arroz en dos temporadas.....	15
Tabla 6	Análisis de varianza de blancura del grano (BG), transparencia del grano (TG) y grado de panza blanca del	

	grano (GPB) evaluados en 20 genotipos de arroz en dos temporadas.....	16
Tabla 7	Análisis de Correlación de Pearson (r) entre el rendimiento de grano (RG) y parámetros de color Intensidad, Hue (tono), Saturación, Luminosidad, a*, b*, u* y v*, obtenidos de imágenes RBG capturadas en a 20 líneas de arroz, durante dos temporadas (2021 - 2022 y 2022 - 2023) y en tres estados fenológicos, antesis (AN), grano lechoso (GL) y grano pastoso (GP).....	22

EFFECTO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN ARROZ Y USO DE HERRAMIENTAS DE DETECCIÓN REMOTA PARA ESTIMACIÓN DE RENDIMIENTO

EFFECT OF WATER STRESS ON RICE AND USE OF REMOTE SENSING TOOLS FOR YIELD ESTIMATION

Palabras claves: *Oryza sativa*, producción, calidad de grano, detección remota, imágenes RGB.

RESUMEN

El arroz (*Oryza sativa* L.) es un cereal de gran importancia económica a nivel nacional, pues aproximadamente dos tercios de la demanda es importada. Su cultivo se lleva a cabo principalmente bajo inundación, lo que implica una alta demanda de agua. Dado el escenario actual de escasez hídrica, se requiere el desarrollo de variedades más productivas en condiciones de déficit hídrico. Este estudio tiene como propósito determinar el efecto del estrés hídrico en genotipos de arroz y el potencial uso de imágenes aéreas para estimar el rendimiento bajo estas condiciones. Se estudiaron 20 genotipos de arroz, incluyendo tres variedades comerciales y 17 líneas experimentales, durante dos temporadas. Se determinaron variables agronómicas, productivas y de calidad de grano y se capturaron imágenes RGB de las parcelas. Varias de las variables evaluadas mostraron diferencias significativas entre genotipos, así como entre temporadas. El rendimiento del grano no mostró diferencias significativas, pero disminuyó en comparación con el potencial bajo condiciones de inundación. Hubo baja asociación entre los parámetros obtenidos de imágenes RGB y el rendimiento. Se requiere evaluar una mayor cantidad genotipos arroz en condiciones de déficit hídrico con el fin de identificar aquellos con potencial para el desarrollo de variedades adecuadas para estas condiciones.

SUMMARY

Rice (*Oryza sativa* L.) is a cereal of great economic importance at the national level since approximately two-thirds of the demand is imported. Its cultivation is mainly under flooding, which implies a high water demand. Given the current water scarcity scenario, developing more productive varieties under water deficit conditions is required. This study aims to determine the effect of water stress on rice genotypes and the potential use of aerial imagery to estimate yield under these conditions. Twenty rice genotypes, including three commercial varieties and 17 experimental lines, were studied during two seasons. Agronomic, yield, and grain quality traits were determined, and RGB images of the plots were captured. Several of the variables evaluated showed significant differences between genotypes, as well as between seasons. Grain yield did not show significant differences but decreased with respect to the yield potential under flooded conditions. There was a low association between parameters obtained from RGB images and yield. It is necessary to evaluate more rice genotypes under water deficit conditions to identify genotypes with potential for developing varieties suitable for these conditions.

INTRODUCCIÓN

El arroz (*Oryza sativa* L.) es una especie monocotiledónea perteneciente a la familia Poaceae y originaria de las regiones húmedas de Asia tropical y subtropical (Vaughan, 1994). Es el segundo cereal más importante en el mundo, después del trigo, abarcando una superficie de 165 millones de hectáreas con una producción anual de 776 millones de toneladas (FAOSTAT, 2022). En Chile la producción para el mismo año fue de 100.557 ton, en una superficie de 20.712 ha (ODEPA, 2022).

El género *Oryza* presenta una alta variabilidad genética, representada por muchas especies y formas cultivadas. Actualmente, existen dos especies cultivadas: *O. sativa* L., originaria del trópico húmedo de Asia, y *Oryza glaberrima* Steud, de África Occidental (Paredes y Becerra, 2015). Ambas especies son diploides ($2n=2x=24$) y poseen un genoma del tipo AA. El género *Oryza* incluye 22 especies, entre silvestres y cultivadas, diploides ($2n=2x=24$) y tetraploides ($2n=4x=48$) y con diferentes tipos de genomas (AA, BB, CC, BBCC, CCDD, EE, FF,

GG, KKLL y HHJJ), las que están distribuidas en varios continentes (Vaughan *et al.*, 2003).

En el arroz asiático se distinguen dos subespecies, *índica* y *japónica*, y cinco tipos: *japónica tropical*, *japónica templado*, *aromático*, *índica* y *aus*. El arroz *japónica templado* es el que se cultiva en Chile puesto que es más tolerante a las bajas temperaturas que se producen en la zona arrocería local (Paredes y Becerra, 2015). El arroz en Chile se cultiva desde Villa Alegre, en el sur de la Región del Maule, hasta San Nicolás, en el norte de la Región de Ñuble. El sistema que predomina en la producción de arroz local es el inundado con uso de semilla previamente germinada. También se utiliza siembra directa, la cual presenta múltiples ventajas como menor uso de agua en los primeros estados de desarrollo del cultivo y mayor posibilidad de mecanización de algunas labores agronómicas, con relación al sistema inundado (Paredes y Becerra, 2015).

Las variedades de arroz que se cultivan en Chile han sido desarrolladas para las condiciones locales por el Programa de Mejoramiento Genético de Arroz (PMGA) del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Entre los principales desafíos del mejoramiento están la obtención de variedades tolerantes a frío y de una mayor precocidad, puesto que las bajas temperaturas alargan el periodo vegetativo del cereal. El sistema inundado que se utiliza para el cultivo del arroz en Chile implica un uso importante de agua, requiriendo entre 18.000 y 20.000 m³ de agua por hectárea (Paredes *et al.*, 2021), lo que, además, hace necesario el desarrollo de variedades más eficientes en el uso del agua, más aún en el actual contexto de escasez hídrica, debido en gran medida al cambio climático.

Chile se encuentra bajo una situación de escasez hídrica, que persiste desde el 2010, que ha sido denominada como una “mega sequía”, y las proyecciones climáticas indican que la disminución de las precipitaciones continuará para la segunda mitad de este siglo, con un déficit del 40 % respecto de los valores actuales (Garreaud *et al.*, 2019). Por lo cual, se plantea un escenario de escasez del recurso hídrico disponible para la producción agrícola y, en particular, para el cultivo de arroz amenazando su productividad y sustentabilidad.

El estrés hídrico es el principal factor limitante para la producción de los cultivos. Sucede cuando la demanda de agua por la planta es mayor que la cantidad disponible en un periodo de tiempo (Boyer, 1982). En particular, el estrés hídrico induce el cierre de los estomas, lo que reduce la conductancia estomática y, en consecuencia, la actividad fotosintética. Al mismo tiempo, reduce la transpiración, disminuyendo la capacidad de enfriamiento de la hoja y provocando un aumento en la temperatura foliar (Berni *et al.*, 2009; Camino *et al.*, 2018). Cuando el déficit hídrico se desarrolla lentamente, las plantas pueden presentar respuestas de aclimatación que tienen efectos sobre el crecimiento, como la disminución de la expansión foliar y el aumento del crecimiento radicular (Potters *et al.*, 2007; Shao *et al.*, 2008). Las plantas también responden al estrés por déficit hídrico a nivel celular y molecular (Shinozaki y Yamaguchi- Shinozaki, 2007). Una de las principales respuestas al estrés hídrico es la modificación de la expresión génica, relacionada con la producción de enzimas clave en la vía de síntesis de osmolitos, proteínas con función protectora, enzimas antioxidantes y otras proteínas involucradas en las respuestas al estrés hídrico (Bray, 1997; Zhu *et al.*, 2002).

En plantas de arroz bajo déficit hídrico disminuye el contenido de clorofila y con ello la tasa fotosintética, lo que acelera la senescencia. En cuanto al crecimiento y producción de biomasa, se produce reducción en la altura de la planta y en el área foliar, enrollamiento de hojas, poca producción de macollas, esterilidad de espiguillas y disminución del llenado del grano y, en consecuencia, se reduce notablemente el rendimiento (Chaudhary *et al.*, 2003).

El fitomejoramiento puede ayudar a desarrollar nuevos cultivares con rasgos mejorados más adecuados para adaptarse a las condiciones del cambio climático y escasez hídrica, utilizando tecnologías tanto convencionales como genómicas (Habash *et al.*, 2009). La resistencia a la sequía ha sido históricamente uno de los objetivos más importantes y comunes en programas de mejoramiento de cultivos a nivel global (Ceccarelli *et al.*, 2004; Ceccarelli y Grando, 2007). En el mejoramiento tradicional se seleccionan los genotipos basados en determinadas características fenotípicas sin conocer el ADN de la planta. Para identificar mejor la variación genética, cuantos más cruces y ambientes se utilicen para la selección, mayor será

la probabilidad de identificar un buen genotipo. Usualmente, el mejoramiento genético se ha llevado a cabo, principalmente, en función del rendimiento del cultivo, debido a la falta de acceso a características fenotípicas (Li *et al.*, 2014).

Recientemente se han desarrollado plataformas de fenotipado eficaces y de alto rendimiento para la caracterización de plantas a gran escala y recopilar datos para estudios cuantitativos de rasgos complejos relacionados con el crecimiento, el rendimiento y la adaptación al estrés biótico o abiótico (enfermedad, insectos, sequía y salinidad). Para ello, se utilizan diversas técnicas de imagen, incluyendo imágenes visibles, de espectroscopía, infrarrojas térmicas, de fluorescencia, imágenes 3D y tomográficas (Li *et al.*, 2014).

Para extraer información fenotípica de grandes extensiones de cultivo se pueden utilizar imágenes satelitales. Sin embargo, en los programas de mejoramiento genético de cultivos se utilizan y evalúan parcelas experimentales de pequeño tamaño, las cuales son fenotipadas con el uso de técnicas de detección próxima (a nivel del campo) o de detección remota con el uso de vehículos aéreos no tripulados o drones (Araus y Cairns, 2014). Los drones tienen la ventaja de que pueden volar cerca del suelo y captar imágenes con una resolución espacial muy alta. Para la captura de imágenes de las parcelas, tanto a nivel del campo como con el uso de drones, se utilizan diversos tipos de cámaras como RGB, multiespectrales, hiperespectrales y térmicas. Desde las imágenes RGB y multiespectrales se pueden obtener diferentes índices, que han mostrado ser buenos indicadores del crecimiento de la planta y la senescencia del cultivo (Kefauver, 2019).

La caracterización de genotipos de arroz, bajo déficit hídrico, mediante la evaluación de variables agronómicas productivas y de calidad de grano permite evaluar el desempeño de los genotipos en condiciones limitantes de agua. Por otro lado, establecer la relación entre información obtenida a partir de imágenes del dosel y parámetros agronómicos y productivos del cultivo podría facilitar el proceso de selección de genotipos en un programa de mejoramiento genético de arroz. El objetivo de este estudio es determinar el efecto del estrés hídrico en diferentes genotipos de arroz y el potencial uso de imágenes RGB para estimar el rendimiento bajo estas condiciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal, diseño de ensayos y manejo del cultivo

Se evaluó un panel de 20 genotipos de arroz durante 2 temporadas (Tabla 1). El panel estuvo compuesto por 17 líneas avanzadas de arroz blanco desarrolladas por el PMGA del INIA, la variedad Sandora, procedente de Hungría, la variedad Dunghan Shali, originaria del sur de Asia y la variedad Zafiro, que representa, aproximadamente, el 70% de la superficie cultivada de arroz en Chile y se utilizó como control. El ensayo se estableció en la Estación experimental del arroz de INIA en San Carlos (36°25'49"S, 72°0'25"O; 161 m.s.n.m).

Tabla 1. Genotipos de arroz a evaluados, Zafiro-INIA es usado como control, Sandora y Dunghan Shali son variedades comerciales y los restantes genotipos son líneas avanzadas desarrolladas por el Programa de mejoramiento genético de arroz del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) de Chile.

Nº	Genotipos	Nº	Genotipos
1	Zafiro - INIA	11	Quila 299502
2	Sandora	12	Quila 300607
3	Dunghan Shali	13	Quila 300705
4	Quila 275602	14	Quila 302710
5	Quila 300603	15	Quila 302901
6	Quila 300602	16	Quila 303002
7	Quila 295908	17	Quila 303004
8	Quila 295910	18	Quila 303009
9	Quila 298004	19	Quila 303001
10	Quila 298218	20	FLQuila 69

El germoplasma se evaluó bajo condiciones de riego (no inundado). Los genotipos se distribuyeron en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Cada parcela estuvo formada por 8 hileras de 3 m de longitud y 0,3 m entre hileras (6 m² cada parcela) y una distancia de 0,5 m entre parcelas. Se utilizó una dosis de siembra de 40 kg ha⁻¹. El riego se reguló en función de la emergencia de las plantas y el contenido de agua del suelo. Cuando las plantas alcanzaron 2,5 hojas y hasta que se completó el llenado de grano, el riego se realizó cada 8 días a capacidad de campo, sin desaguar al regar; entre los estados fenológicos de bota y floración se

mantuvo una lámina de agua de 5 cm. El manejo del suelo previo al establecimiento del ensayo, así como la fertilización y control de malezas se realizó de manera convencional (Paredes y Becerra, 2015).

Variables agronómicas, productivas y de calidad de grano

Se determinó los días desde siembra hasta floración y la altura de planta. A cosecha se evaluó largo de panícula, número total de granos por panícula, número de granos llenos por panícula, número de granos estériles por panícula, porcentaje de esterilidad, porcentaje de grano entero, peso de mil granos y rendimiento de grano al 14 % de contenido de humedad. Adicionalmente, se determinó blancura y transparencia del grano con el uso del Rice Milling Meter MM1D (Satake, Japón), las dimensiones de largo y ancho del grano con el uso del programa GrainScan 1.0.4 (CSIRO, Australia) y el grado de panza blanca se obtuvo mediante una escala visual en el rango de 1 a 5, según grado de opacidad o turbidez en el grano (Chen *et al.*, 2011).

Detección remota

Se llevó a cabo en los estados fenológicos de antesis y llenado de grano (grano lechoso y grano pastoso). En cada medición se obtuvieron imágenes RGB (Red, Green y Blue en inglés) de las parcelas utilizando un dron DJI Matrice 200 (DJI Sciences and Technologies Ltd., China), equipado con una cámara ZENMUSE XT2, que contiene un sensor RGB 1/1,7" CMOS de 12 MP. Los vuelos se realizaron a una altura de 30 metros sobre el suelo. En cada momento de evaluación, se colectaron las imágenes alrededor del cenit, 13:00 hrs., en días totalmente despejados.

Se generaron ortomosaicos de las imágenes RGB obtenidas utilizando el software Agisoft Metashape (Agisoft LLC, Rusia). Posterior a ello, se obtuvieron desde los mosaicos imágenes individuales de cada parcela. Para el análisis de las imágenes se utilizó el software de código abierto BreedPix 0.2 (Casadesús *et al.*, 2007; Vergara-Díaz *et al.*, 2016; Kefauver *et al.*, 2017), con el cual se obtuvieron los parámetros de color (matiz, saturación, intensidad, luminosidad, a^* , b^* , u^* , v^*).

Análisis estadístico

El análisis estadístico de las variables agronómicas, productivas y de calidad de grano se realizó mediante análisis de varianza (ANOVA). Previo al análisis se verificó el cumplimiento de las premisas, normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk y homocedasticidad a través de la prueba de Levene. Las diferencias entre las medias se establecieron a través de la prueba HSD de Tukey ($p < 0,05$). Todos los análisis se llevaron a cabo con el programa Statgraphics XV (StatPoint Inc, EE.UU.). Adicionalmente, se realizaron análisis de correlación de Pearson y análisis de componentes principales (ACP) para establecer la relación entre los rasgos evaluados y entre estos y el desempeño de los genotipos. Los análisis de correlación y ACP se realizaron en Rstudio versión 4.2.1 (PBC, MA, EE.UU.)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El déficit hídrico afecta la fenología, la producción de biomasa y rendimiento en arroz (Chavez *et al.*, 2002; Bonhert y Jensen, 1996; Shao *et al.*, 2007). En este estudio los días floración (DF) no mostraron interacción genotipo x temporada, pero sí diferencias estadísticamente significativas entre genotipos y entre temporadas (Tabla 2). Los días de floración variaron entre 114 y 134 días. El genotipo más precoz fue Quila 302710 y los más tardíos Quila 295908 y Zafiro, con una diferencia de 20 días, aproximadamente. Zafiro-INIA es una variedad semi tardía, con un periodo de siembra a floración entre 100-129 días posterior a la siembra (Paredes *et al.*, 2014). En este estudio aumentó los días a floración respecto a lo reportado para la variedad, lo cual pudo deberse al efecto del estrés hídrico, ya que se ha visto que en estas condiciones se atrasa la fenología del cultivo (Ramírez *et al.*, 2002; Degiovanni *et al.*, 2010). La temporada 2022 / 2023 fue en promedio 4 días más temprana. En la altura de la planta (AP) no hubo diferencias estadísticas en genotipo x temporada, tampoco entre temporadas, pero sí entre genotipos (Tabla 2). La altura varió entre 71 y 93 cm aproximadamente, siendo Quila 302901 la de menor tamaño, pero sin diferenciarse significativamente de otros ocho genotipos, y la de mayor tamaño fue Quila 303009. Para Zafiro-INIA se reporta una altura entre 85 - 106 cm (Paredes *et al.*, 2014), obteniéndose, por tanto, una menor altura en este ensayo bajo condiciones de estrés. En el rendimiento de grano (RG) la interacción genotipo

x temporada no fue significativa, tampoco hubo diferencias entre genotipos y temporadas (Tabla 2).

Tabla 2. Análisis de varianza de días de floración (DF), altura de la planta (AP), rendimiento de grano (RG) y porcentaje de grano entero (PGE) evaluados en 20 genotipos de arroz en dos temporadas.

Genotipo (G)	DF (días)	AP (cm)	RG (ton ha ⁻¹)	PGE (%)
Zafiro	134,5 ± 4,1 j	81,4 ± 8,2b	4,0 ± 1,3	63,9 ± 4,1 abc
Sandora	118,3 ± 2,7 ab	74,1 ± 3,9cdef	4,8 ± 0,9	62,5 ± 3,7 abcd
Dunghan Shali	120,0 ± 3,8 bcdef	82,9 ± 7,6 b	4,3 ± 1,2	58,8 ± 7,1 d
FLQuila 69	125,2 ± 2,8 efghi	74,3 ± 1,3 cdef	4,3 ± 0,6	64,7 ± 3,6 abc
Quila 275602	128,0 ± 3,3 ghi	79,9 ± 3,7 bcde	6,0 ± 1,2	66,1 ± 3,5 ab
Quila 295908	134,7 ± 2,4 j	84,2 ± 7,6 b	5,0 ± 0,9	66,3 ± 4,8 a
Quila 295910	130,3 ± 3,9 ij	82,7 ± 5,8 b	5,1 ± 0,7	66,4 ± 2,6 a
Quila 298004	124,3 ± 3,9 fghi	73,4 ± 3,5 def	4,2 ± 1,2	65,9 ± 2,5 ab
Quila 298218	120,5 ± 2,6 abcde	85,6 ± 7,8 b	5,2 ± 0,9	62,3 ± 3,0 abcd
Quila 299502	117,8 ± 1,1 abc	71,9 ± 5,0 f	5,3 ± 0,8	53,8 ± 4,7 e
Quila 300602	127,5 ± 2,6 hi	71,5 ± 6,5 f	3,9 ± 1,2	64,6 ± 3,9 abc
Quila 300603	124,2 ± 3,7 defghi	71,9 ± 2,7 f	4,3 ± 1,2	63,9 ± 4,7 abc
Quila 300607	121,5 ± 2,9 bcdefg	80,3 ± 5,0 bcd	4,7 ± 1,4	61,9 ± 4,9 abcd
Quila 300705	125,7 ± 4,4 ghi	86,4 ± 4,0 ab	4,0 ± 0,8	61,3 ± 5,4 bcd
Quila 302710	114,8 ± 5,9 a	72,5 ± 9,1 f	3,9 ± 1,9	51,7 ± 7,9 e
Quila 302901	118,5 ± 4,6 abcde	71,0 ± 3,1 f	4,6 ± 1,1	62,4 ± 3,5 abcd
Quila 303002	118,3 ± 6,6 abcd	73,1 ± 4,5 ef	5,3 ± 1,5	64,8 ± 4,9 abc
Quila 303004	122,7 ± 6,1 bcdefg	81,8 ± 3,9 bc	4,7 ± 1,6	60,9 ± 1,1 cd
Quila 303009	124,5 ± 3,0 efghi	93,1 ± 8,7 a	5,4 ± 1,6	64,3 ± 3,0 abc
Quila 303011	124,2 ± 5,2 efghi	83,8 ± 3,8 b	5,4 ± 0,3	63,6 ± 3,9 abcd
P	0,0000	0,0000	0,1516	0,0000
Temporada (T)				
2021/2022	125,9 ± 5,9 b	79,6 ± 6,1	4,9 ± 1,0	61,0 ± 5,6 b
2022/2023	121,7 ± 6,6 a	77,9 ± 10,2	4,5 ± 1,6	63,9 ± 5,7 a
P	0,0001	0,1214	0,1379	0,0004
G x T				
P	0,3121	0,3350	0,2642	0,0787

Los valores representan la media ± la desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticamente significativas según prueba de Tukey (p < 0,05).

En los genotipos, el promedio global fue de 4,7 ton ha⁻¹. Quila 275602 tendió a presentar el mayor rendimiento con 6,0 ton ha⁻¹ y los genotipos Quila 300602 y Quila

302710 a los menores rendimientos. El rendimiento alcanzado por Quila 275602 fue, de hecho, un 33 % mayor que el alcanzado por Zafiro-INIA. Para esta variedad comercial se reporta un rendimiento potencial de 10 ton ha⁻¹ (Paredes *et al.*, 2014), alcanzando en este estudio un 40 % de su potencial. Estudios realizados en arroz bajo déficit hídrico indican que la altura, producción de biomasa y el rendimiento disminuyen en comparación a un cultivo de arroz bajo condiciones normales (Ramírez *et al.*, 2002; Degiovanni *et al.*, 2010). En el porcentaje de grano entero (PGE) no mostró una interacción genotipo x temporada significativa, pero sí hubo diferencias estadísticas entre genotipos y temporadas (Tabla 2). Los genotipos Quila 302710 y Quila 299502 presentaron los menores valores con 51,7 % y 53,8 %, respectivamente, diferenciándose de los demás genotipos, Quila 295910 tendió a mostrar el mayor PGE con 66,4 %. En la temporada 2022 / 2023 fue 4,5 % mayor el porcentaje de grano entero (Tabla 2).

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos para diferentes variables agronómicas. En el largo de panícula (LP) la interacción genotipo x temporada no fue significativa. Entre los genotipos tampoco se presentó diferencias significativas, variando el largo de panícula entre 15,1 cm y 19,3 cm, valores obtenidos en Quila 300602 y Quila 298218, respectivamente (Tabla 3). Entre las temporadas, tampoco hubo diferencias significativas, aunque en la temporada 2022 / 2023 el largo de panícula fue 1,1 cm mayor. Se ha observado que el largo de panícula en condiciones de cultivo convencional puede variar entre 24 y 30 cm, dependiendo del genotipo, mientras que, bajo estrés hídrico, este parámetro puede reducirse entre un 5 % y un 15 % (Al-Naggar *et al.*, 2020; Sabagh *et al.*, 2021). El peso de mil granos con cáscara (PMGC) presentó diferencias estadísticamente significativas en la interacción genotipo x temporada, al igual que en los genotipos (Tabla 3). Quila 295908 y Zafiro tuvieron los mayores pesos con 35,1 g y 35,2 g respectivamente, lo cual podría indicar una mayor capacidad de mantener el llenado de los granos bajo condiciones de estrés, mientras que Dunghan Shali presentó el menor peso con 27,5 g, aunque este no se diferenció de otros cuatro genotipos (Tabla 3). Estudios realizados en Zafiro y Sandora en condiciones óptimas de cultivo, han reportado que ambos genotipos tienen alto rendimiento y pesos de mil granos superiores, con

Sandora llegando hasta 41 g en condiciones convencionales de manejo agronómico (Liang *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2020). Por el contrario, bajo estrés hídrico, estos valores tienden a disminuir debido al impacto negativo en el llenado de los granos (El Sabagh *et al.*, 2021).

Tabla 3. Análisis de varianza del largo de panícula (LP), peso de mil granos con cáscara (PMGC), peso de mil granos pulidos (PMGP) evaluados en 20 genotipos de arroz en dos temporadas.

Genotipo (G)	LP (cm)	PMGC (g)	PMGP (g)
Zafiro	17,2 ± 0,4	35,2 ± 0,9 b	24,5 ± 0,5 b
Sandora	16,1 ± 1,0	27,7 ± 1,1 g	19,7 ± 0,3 kl
Dunghan Shali	16,7 ± 1,3	27,5 ± 1,0 g	18,8 ± 0,4 l
FLQuila 69	16,5 ± 0,9	31,9 ± 0,8 cd	22,1 ± 0,7 cde
Quila 275602	17,9 ± 1,3	29,5 ± 3,0 de	20,0 ± 0,7 jk
Quila 295908	16,9 ± 1,3	35,1 ± 1,1 b	24,3 ± 0,7 b
Quila 295910	17,3 ± 0,8	32,1 ± 1,1 cd	22,3 ± 0,9 cde
Quila 298004	16,0 ± 0,7	28,4 ± 1,2 fg	20,6 ± 1,4 hijk
Quila 298218	19,3 ± 1,2	34,7 ± 2,4 b	22,7 ± 0,9 c
Quila 299502	16,4 ± 0,4	37,5 ± 2,5 a	27,1 ± 0,7 a
Quila 300602	15,1 ± 0,9	29,2 ± 1,1 def	20,8 ± 0,5 ghij
Quila 300603	15,2 ± 0,7	30,0 ± 1,1 de	21,2 ± 0,7 fghi
Quila 300607	17,5 ± 0,6	30,8 ± 0,7 cde	21,4 ± 0,8 efgh
Quila 300705	17,4 ± 1,4	30,7 ± 0,7 cde	21,6 ± 0,5 defg
Quila 302710	17,5 ± 1,0	34,9 ± 1,5 b	24,7 ± 0,8 b
Quila 302901	15,9 ± 0,8	27,6 ± 1,4 g	19,7 ± 0,5 kl
Quila 303002	16,7 ± 0,9	28,3 ± 1,3 fg	20,5 ± 1,0 ijkl
Quila 303004	18,8 ± 0,8	32,2 ± 1,2 cd	22,5 ± 1,5 cd
Quila 303009	18,9 ± 0,6	32,5 ± 1,9 c	22,2 ± 0,7 cde
Quila 303011	17,4 ± 0,7	30,6 ± 1,9 de	21,8 ± 0,4 cdef
P	0,7789	0,0000	0,0000
Temporada (T)			
2021/2022	16,5 ± 1,4	31,3 ± 3,5	21,8 ± 2,2
2022/2023	17,6 ± 1,3	31,4 ± 3,0	22,0 ± 2,1
P	0,9687	0,7778	0,2265
GxT			
P	0,9935	0,0463	0,0606

Los valores representan la media ± la desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticamente significativas según prueba de Tukey ($p < 0,05$).

En el peso de mil granos pulidos (PMGP) no hubo diferencias estadísticamente significativas en genotipo x temporada, sin embargo, hubo diferencias significativas entre los genotipos, este varió entre 27,1 g y 18,8 g, obtenidos en Quila 299502 y Dunghan Shali, respectivamente (Tabla 3). El PMGC y PMGP en Quila 299502 fue estadísticamente diferente al del resto de los genotipos, lo cual sugiere una mayor tolerancia al estrés hídrico.

Se obtuvo diferencias significativas en el número de granos totales por panícula (NGT/P) en la interacción genotipo x temporada y entre los genotipos evaluados (Tabla 4). El genotipo Quila 275602 mostró el mayor NGT/P con 104,1, aunque este no se diferenció estadísticamente de otros cuatro genotipos, mientras que Zafiro tendió a presentar el menor NGT/P con 65,3, siendo 37,3 % menor que el alcanzado por Quila 275602. Estos resultados indican una variabilidad genética significativa en la capacidad de producción de granos y tolerancia al estrés hídrico entre los genotipos (Liu *et al.*, 2022). En condiciones de cultivo convencional, el NGT/P puede variar ampliamente según las prácticas de manejo y las condiciones ambientales. Según Paredes y Becerra (2015), el NGT/P en condiciones óptimas puede oscilar entre 80 y 120 granos, dependiendo del genotipo y las condiciones de cultivo. En la segunda temporada el NGT/P fue 10,8% mayor. Esta diferencia puede deberse a factores como la disponibilidad de agua y la temperatura, los que influyen significativamente en la fisiología de la planta y la productividad de granos (Smith *et al.*, 2019). Las diferencias significativas en la interacción genotipo x temporada y entre los genotipos en el número de granos llenos por panícula (NGLL/P) destacan la variabilidad en la eficiencia de llenado de granos por parte de la planta. Quila 275602 tendió igualmente a mostrar el mayor NGLL/P con 72,4, mientras que Quila 300602 tendió a presentar el menor número con una media de 42,4 (Tabla 4). En cuanto a las temporadas, no se observaron diferencias significativas, lo que indica que esta variable es menos susceptible a variaciones estacionales. Según Gao *et al.* (2020) el NGLL/P es un indicador clave de la eficiencia reproductiva y está altamente correlacionado con el rendimiento final. En condiciones de riego controlado suele ser menor que en condiciones inundadas debido a que el estrés

hídrico puede afectar el llenado de granos (Bouman *et al.*, 2007). En condiciones de cultivo convencional el NGLL/P varía entre 50 y 90 granos (Singh *et al.*, 2017).

Tabla 4. Análisis de varianza de número de granos totales por panícula (NGT/P), número de granos llenos por panícula (NGLL/P) y porcentaje de esterilidad de la planta (PE) evaluados en 20 genotipos de arroz en dos temporadas.

Genotipo (G)	NGT/P	NGLL/P	PE (%)
Zafiro	65,3 ± 9,4 f	50,2 ± 7,5 cd	22,9 ± 6,2 efg
Sandora	86,2 ± 12,2 bcde	62,2 ± 14,2 abc	28,2 ± 10,5 cdefg
Dunghan Shali	72,3 ± 12,0 ef	52,5 ± 9,7 bcd	27,1 ± 7,1 cdefg
FLQuila 69	81,2 ± 6,1 cde	60,9 ± 8,3 abc	25,2 ± 5,9 defg
Quila 275602	104,1 ± 15,0 a	72,4 ± 24,6 a	32,1 ± 16,0 abcdefg
Quila 295908	72,1 ± 19,6 ef	58,1 ± 19,3 abcd	20,4 ± 6,3 g
Quila 295910	88,2 ± 17,1 bcd	67,9 ± 10,8 ab	22,2 ± 7,5 fg
Quila 298004	77,2 ± 12,0 def	43,0 ± 12,3 d	44,9 ± 9,4 a
Quila 298218	96,3 ± 11,9 ab	63,4 ± 18,4 abc	35,2 ± 12,6 abcdef
Quila 299502	76,7 ± 11,0 def	54,0 ± 10,7 bcd	29,6 ± 10,1 bcdefgh
Quila 300602	76,4 ± 11,0 def	42,4 ± 8,6 d	44,5 ± 8,5 a
Quila 300603	76,7 ± 16,3 def	47,5 ± 15,0 cd	38,5 ± 10,6 abcd
Quila 300607	91,9 ± 13,8 abc	51,5 ± 16,8 bcd	44,7 ± 13,9 a
Quila 300705	93,7 ± 20,0 abc	52,6 ± 12,6 bcd	43,2 ± 9,1 ab
Quila 302710	88,2 ± 16,5 bcd	55,6 ± 24,2 abcd	39,7 ± 18,2 abc
Quila 302901	85,0 ± 12,7 bcde	56,8 ± 10,1 abcd	32,9 ± 9,2 abcdefg
Quila 303002	90,6 ± 15,1 abcd	58,1 ± 20,8 abcd	36,8 ± 19,5 abcde
Quila 303004	82,9 ± 6,7 bcde	54,0 ± 14,4 bcd	35,6 ± 14,2 abcdef
Quila 303009	87,2 ± 11,4 bcd	63,3 ± 19,1 abc	28,3 ± 15,9 cdefg
Quila 303011	86,3 ± 21,0 bcde	61,1 ± 10,9 abc	26,6 ± 13,7 cdefg
P	0,0001	0,1038	0,0035
Temporada (T)			
2021/2022	79,1 ± 17,2 b	55,9 ± 14,0	29,3 ± 9,8 b
2022/2023	88,7 ± 15,0 a	56,9 ± 19,6	36,6 ± 16,7 a
P	0,0001	0,7134	0,0020
GxT			
P	0,0004	0,0143	0,4968

Los valores representan la media ± la desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticamente significativas según prueba de Tukey ($p < 0,05$).

En el porcentaje de esterilidad (PE) no hubo diferencias estadísticas en genotipos x temporadas (Tabla 4). Por otra parte, las diferencias significativas en el porcentaje

de esterilidad (PE) tanto entre los genotipos como entre las temporadas destacan la sensibilidad de esta variable a las condiciones hídricas de cultivo. Quila 300607 tendió a presentar el mayor PE con 44,7 %, mientras que Quila 295908 tendió al menor con una media de 20,4 %. Además, la temporada 2022/2023 mostró un PE mayor 19,9 % mayor (Tabla 4). El porcentaje de esterilidad en arroz puede verse afectado por factores como el estrés hídrico, la nutrición y las temperaturas extremas durante la floración (Wang *et al.*, 2018). En condiciones óptimas, el PE suele variar entre 10 % y 30 %, dependiendo de la variedad y las condiciones ambientales (Wang *et al.*, 2018).

Las dimensiones del grano, largo (L) y ancho (A), y la relación largo/ancho (L/A) no mostraron diferencias significativas en la interacción genotipo x temporada, entre genotipos, ni entre temporadas (Tabla 5). El largo del grano fue en promedio 6,5 mm y el ancho 2,4 mm. La estabilidad de estos rasgos bajo distintas condiciones puede ser utilizada como un indicador de selección confiable en programas de mejoramiento genético de arroz. Los resultados del ensayo indican que el largo y ancho del grano puede ser considerado un rasgo estable y predictivo del fenotipo deseado en diversas condiciones de cultivo. La estabilidad en las dimensiones del grano es coherente con estudios previos que indican que es una característica fenotípica altamente controlada genéticamente y menos susceptible a variaciones ambientales (Cuevas *et al.*, 2016; Juliano, 2007; Khush y Virk, 2005; Zhou *et al.*, 2015). Por consiguiente, la relación largo/ancho del grano (L/A) tampoco mostró diferencias significativas en la interacción genotipo x temporada, entre los genotipos ni entre las temporadas (Tabla 5). La L/A se mantuvo prácticamente constante con un promedio de 2,7 mm. Esta relación es un indicador crucial de la calidad del grano y es generalmente estable (Wu *et al.*, 2010). La estabilidad de la relación L/A sugiere que ambos componentes, largo y ancho del grano, están genéticamente diseñados para mantener una forma de grano específica, lo cual es importante para las preferencias del mercado y las cualidades culinarias del arroz (Fitzgerald *et al.*, 2009).

Tabla 5. Análisis de varianza del largo del grano (L), ancho del grano (A) y relación de largo/ancho del grano (L/A) evaluados en 20 genotipos de arroz en dos temporadas.

Genotipo (G)	L (mm)	A (mm)	L/A
Zafiro	6,5 ± 0,2	2,4 ± 0,1	2,7 ± 0,1
Sandora	6,5 ± 0,2	2,4 ± 0,1	2,7 ± 0,1
Dunghan Shali	6,5 ± 0,3	2,4 ± 0,0	2,7 ± 0,1
FLQuila 69	6,5 ± 0,0	2,4 ± 0,1	2,7 ± 0,1
Quila 275602	6,4 ± 0,4	2,4 ± 0,1	2,7 ± 0,2
Quila 295908	6,5 ± 0,2	2,4 ± 0,1	2,7 ± 0,1
Quila 295910	6,6 ± 0,2	2,5 ± 0,1	2,7 ± 0,1
Quila 298004	6,4 ± 0,2	2,4 ± 0,1	2,7 ± 0,1
Quila 298218	6,6 ± 0,3	2,4 ± 0,1	2,7 ± 0,1
Quila 299502	6,3 ± 0,4	2,5 ± 0,1	2,6 ± 0,2
Quila 300602	6,3 ± 0,4	2,4 ± 0,1	2,7 ± 0,2
Quila 300603	6,5 ± 0,3	2,4 ± 0,1	2,7 ± 0,1
Quila 300607	6,6 ± 0,2	2,4 ± 0,1	2,8 ± 0,1
Quila 300705	6,6 ± 0,2	2,4 ± 0,1	2,7 ± 0,1
Quila 302710	6,3 ± 0,4	2,5 ± 0,0	2,5 ± 0,2
Quila 302901	6,5 ± 0,4	2,4 ± 0,1	2,7 ± 0,1
Quila 303002	6,7 ± 0,1	2,5 ± 0,1	2,7 ± 0,1
Quila 303004	6,3 ± 0,3	2,6 ± 0,1	2,6 ± 0,1
Quila 303009	6,4 ± 0,2	2,5 ± 0,1	2,6 ± 0,1
Quila 303011	6,2 ± 0,5	2,5 ± 0,1	2,5 ± 0,2
P	0,6141	0,7189	0,3809
Temporada (T)			
2021/2022	6,4 ± 0,3	2,4 ± 0,1	2,7 ± 0,2
2022/2023	6,5 ± 0,3	2,4 ± 0,1	2,7 ± 0,2
P	0,6505	0,7192	0,7528
GxT			
P	0,3693	0,7262	0,1334

Los valores representan la media ± la desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticamente significativas según prueba de Tukey ($p < 0,05$).

En la Tabla 6 se muestra el análisis de variables de calidad de grano. Para la blancura del grano (BG) no hubo interacción en genotipo x temporada, tampoco hubo diferencias en los genotipos, esta varió entre 34,0 y 40,3 en los genotipos Quila 298004 y Quila 299502, respectivamente. Entre las temporadas hubo diferencias significativas disminuyendo un 11,4 % en la segunda temporada.

Tabla 6. Análisis de varianza de blancura del grano (BG), transparencia del grano (TG) y grado de panza blanca del grano (GPB) evaluados en 20 genotipos de arroz en dos temporadas.

Genotipo (G)	BG	TG	GPB (°)
Zafiro	36,6 ± 1,5	3,3 ± 0,2	0,1 ± 0,0 efg
Sandora	36,6 ± 5,0	2,9 ± 0,5	0,2 ± 0,1 def
Dunghan Shali	35,9 ± 3,2	2,6 ± 0,4	0,4 ± 0,3 b
FLQuila 69	34,7 ± 3,8	3,1 ± 0,4	0,1 ± 0,1 defg
Quila 275602	36,9 ± 3,2	3,1 ± 0,3	0,1 ± 0,1 def
Quila 295908	36,9 ± 2,4	3,4 ± 0,2	0,1 ± 0,1 def
Quila 295910	35,4 ± 3,5	2,9 ± 0,4	0,3 ± 0,1 bc
Quila 298004	34,0 ± 4,9	2,9 ± 0,5	0,1 ± 0,0 efg
Quila 298218	37,9 ± 3,2	3,3 ± 0,3	0,1 ± 0,0 fg
Quila 299502	40,3 ± 2,6	3,2 ± 0,2	1,7 ± 0,6 a
Quila 300602	34,8 ± 3,7	2,9 ± 0,4	0,0 ± 0,0 g
Quila 300603	35,4 ± 3,2	2,9 ± 0,3	0,1 ± 0,0 fg
Quila 300607	37,2 ± 2,9	3,3 ± 0,2	0,1 ± 0,1 cde
Quila 300705	35,1 ± 2,6	3,1 ± 0,3	0,1 ± 0,0 efg
Quila 302710	36,1 ± 5,8	3,2 ± 0,6	0,4 ± 0,3 bc
Quila 302901	36,9 ± 4,2	2,8 ± 0,4	0,1 ± 0,1 def
Quila 303002	36,9 ± 4,2	2,9 ± 0,4	0,1 ± 0,1 def
Quila 303004	39,2 ± 2,4	3,3 ± 0,2	0,2 ± 0,1 bcd
Quila 303009	37,3 ± 2,6	3,3 ± 0,2	0,1 ± 0,0 efg
Quila 303011	36,1 ± 3,2	3,2 ± 0,3	0,1 ± 0,1 ef
P	0,1757	1,0000	0,0000
Temporada (T)			
2021/2022	38,7 ± 2,6 a	3,2 ± 0,3	0,3 ± 0,5 a
2022/2023	34,3 ± 3,5 b	2,9 ± 0,5	0,2 ± 0,3 b
P	0,0000	0,9362	0,0459
GxT			
P	0,8433	1,0000	0,0696

Los valores representan la media ± la desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticamente significativas según prueba de Tukey ($p < 0,05$).

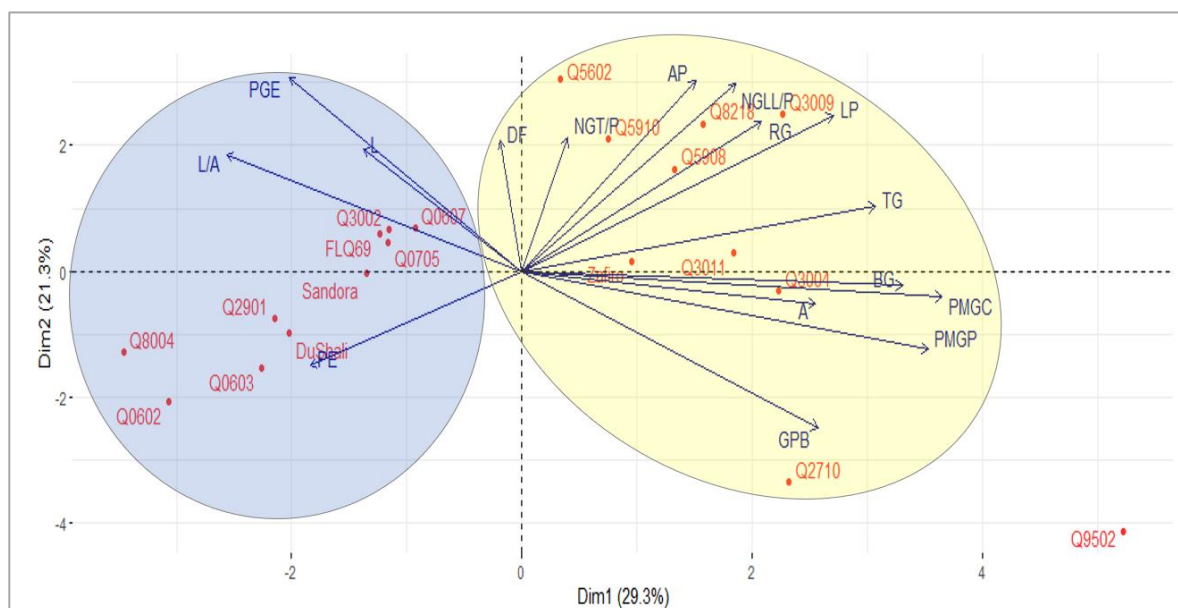
La blancura del grano es un factor importante en la calidad del arroz y puede ser influenciada por el manejo postcosecha y las condiciones de almacenamiento (Juliano, 2007). En condiciones óptimas, la blancura del grano se mantiene relativamente constante, aunque puede ocurrir variaciones debido a factores ambientales y de procesamiento (Juliano, 2007). En cuanto a la transparencia del

grano (TG) no hubo diferencias estadísticas en genotipo x temporada, no se presentaron diferencias significativas entre los genotipos y tampoco entre las temporadas. La TG estuvo en el rango de 2,6 a 3,4 en los genotipos Dunghan Shali y Quila 295908, respectivamente (Tabla 6). Al igual que la blancura, transparencia del grano también disminuyó en la segunda temporada, en este caso, la reducción fue de 9,4 % (Tabla 6). La transparencia del grano es una característica de calidad de grano que puede ser influenciada por factores genéticos y prácticas de manejo, pero generalmente es menos variable en comparación con otros rasgos de calidad. Se ha demostrado que la transparencia está mayormente determinada a nivel genético y las condiciones de cultivo tienen un impacto menor (López *et al.*, 2018). El grado de panza blanca (GPB) no mostró interacción en genotipo x temporada, sin embargo, se presentaron diferencias significativas entre los genotipos siendo Quila 299502 el de mayor GPB (1,7°) y diferenciándose del resto de los genotipos. En tanto, Quila 300602 tendió al menor valor (0,0°) (Tabla 6). Entre las temporadas hubo diferencias significativas, disminuyendo el GPB en 0,1° en la segunda temporada (Tabla 6). La panza blanca es un defecto del grano que puede ser influenciado por factores genéticos y ambientales (Fan *et al.*, 2000). En condiciones de cultivo convencional, la incidencia de panza blanca puede ser reducida a través del manejo adecuado de la nutrición y el riego durante el llenado de grano (Fan *et al.*, 2000).

Análisis de Componentes Principales

Se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para establecer las relaciones entre los genotipos y las variables agronómicas, productivas y de calidad evaluadas (Figura 1). Los componentes 1 y 2 explicaron el 50,6 % de la variabilidad de los datos. Los genotipos se separaron en dos grupos de acuerdo con el componente 1. En el primer grupo se agrupan los genotipos Quila 303002, Quila 300607, FLQuila 69, Quila 300705, Sandora, Quila 302901, Dunghan Shali, Quila 300603, Quila 300602, Quila 298004. Esta agrupación estuvo determinada por el porcentaje de grano entero, largo del grano, relación largo/ancho del grano y porcentaje de esterilidad.

Figura 1. Análisis de Componentes Principales (PCA) de rasgos agronómicos, productivos y de calidad de 20 genotipos de arroz cultivados bajo condiciones de estrés hídrico durante dos temporadas.



DF: días a floración, AP: altura de planta, RG: rendimiento de grano, PGE: porcentaje de grano entero, LP: largo de panícula, PMGC: peso de mil granos con cáscara, PMGP: peso de mil granos pulido, NGT/P: número de granos totales por panícula, NGLL/P: número de granos por panícula, PE: porcentaje de esterilidad, L: largo de grano, A: ancho de grano, L/A: relación largo/ancho, BG: blancura de grano, TG: transparencia de grano, GPB: grado de panza blanca. Genotipos: Zafiro-INIA, Sandora, Dunghan Shali: DunShali, FLQ69: FLQ69, Quila 275602: Q5602, Quila 295908: Q5908, Quila 295910: Q5910, Quila 298218: Q8218, Quila 299502: Q9502, Quila 300602: Q0602, Quila 300603: Q0603, Quila 300607: Q0607, Quila 300705: Q0705, Quila 302710: Q2710, Quila 302901: Q2901, Quila 303002: Q3002, Quila 303004: Q3004, Quila 303009: Q3009 y Quila 303011: Q3011.

En el segundo grupo se agruparon los genotipos Quila 275602, Quila 295910, Quila 298218, Quila 303009, Quila 295908, Zafiro, Quila 303011, Quila 303004 y Quila 302710. Este fue grupo fue determinado por altura de la planta, días de floración, número de granos totales por panícula, número de granos llenos por panícula, rendimiento de grano, largo de panícula, transparencia de grano, blancura de grano, ancho del grano, peso de mil granos y grado de panza blanca. Por otro lado, el genotipo Quila 309502, aunque se ubicó igualmente a la derecha, respecto al CP1, se distanció en gran medida de la mayoría de los genotipos del grupo.

En el primer grupo, en general, todos los genotipos se agruparon de manera cercana a excepción de Quila 298004 y Quila 300602, quienes tuvieron los dos

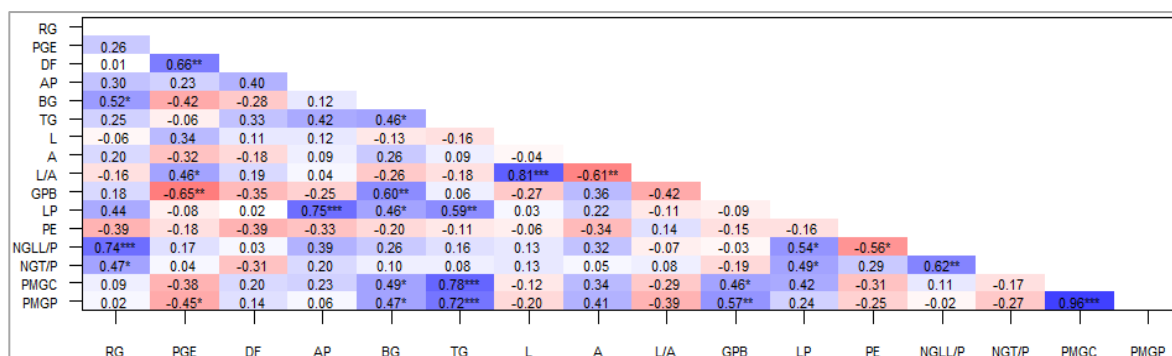
mayores porcentajes de esterilidad, con valores significativamente superiores al del resto de los genotipos (Figura 1). En el segundo hay una mayor dispersión de los genotipos. Destaca el genotipo Q302710, el cual se encuentra alejado del resto, debido, principalmente, a que posee un alto grado de panza blanca. También resalta el genotipo Quila 275602 el cual presenta valores máximos de número de granos totales por panícula, número de granos llenos por panícula y rendimiento de grano (RG) entre todos los genotipos. En tanto, la ubicación de Zafiro estuvo determinada, en gran medida, por los días de floración, siendo el genotipo más tardío. Finalmente, el genotipo Quila 299502 no se ubicó dentro de ningún grupo, lo que estuvo fuertemente influenciado por el grado de panza blanca, presentando el mayor valor entre los genotipos y, por otro lado, por la relación largo/ancho, presentando una de las medias más bajas de esta variable.

Correlaciones entre variables agronómicas, productivas y de calidad

El análisis de correlación muestra las relaciones entre las variables agronómicas, productivas y de calidad evaluadas (Figura 2). En general, fueron significativas ($p \leq 0,05$) las correlaciones mayores a 0,45 y menores a -0,44. Se obtuvo correlaciones altas y positivas entre peso de mil granos con cáscara y peso de mil granos pulidos ($r = 0,96$) y relación largo/ancho del grano y largo del grano ($r = 0,81$), estos últimos rasgos son indicadores de la calidad del grano y, generalmente, estables genéticamente (Fitzgerald *et al.*, 2009; Wu *et al.*, 2010). Mostraron también correlaciones positivas peso de mil granos con cáscara y transparencia de grano ($r = 0,78$) y peso de mil granos pulidos y transparencia de grano ($r = 0,72$), esta relación es también un indicador de calidad, los granos de alta calidad suelen ser de mayor peso y más transparentes, indicando un buen desarrollo y una menor presencia de defectos (Wu *et al.*, 2010). Fue también positiva la correlación entre largo de panícula y altura de planta ($r = 0,75$), aunque esta relación puede variar de acuerdo al genotipo, en general, una planta más alta suele tener una mayor capacidad para desarrollar una panícula más extensa, lo que puede aumentar el número de granos que puede soportar (Virmani *et al.*, 1985). De igual modo, se observó una correlación positiva entre el número de granos llenos por panícula y rendimiento de grano ($r = 0,74$), siendo el número de granos en la panícula un

componente principal del rendimiento (Peng *et al.*, 1999). Asimismo, se obtuvo correlaciones positivas entre días a floración y porcentaje de grano entero ($r = 0,66$); en general, un ciclo de crecimiento más largo genera puede resultar en un desarrollo óptimo de los granos y mayor porcentaje de grano entero, aunque condiciones desfavorables para el cultivo como el estrés hídrico, pueden afectar negativamente la calidad del grano (Zhao *et al.*, 2020). Se observaron también correlaciones positivas entre número de granos totales por panícula y número de granos llenos por panícula ($r = 0,62$), parámetros de rendimiento que están estrechamente relacionados, y entre grado de panza blanca y blancura de grano ($r = 0,60$), siendo estos últimos parámetros importantes en la calidad del arroz (Juliano, 2007).

Figura 2. Análisis de Correlación de Pearson entre variables agronómicas, productivas y de calidad obtenidas en genotipos de arroz cultivados bajo condiciones de estrés hídrico durante dos temporadas.



DF: días a floración, AP: altura de planta, RG: rendimiento de grano, PGE: porcentaje de grano entero, LP: largo de panícula, PMGC: peso de mil granos con cáscara, PMGP: peso de mil granos pulido, NGT/P: número de granos totales por panícula, NGLL/P: número de granos por panícula, PE: porcentaje de esterilidad, L: largo de grano, A: ancho de grano, L/A: relación largo/ancho, BG: blancura de grano, TG: transparencia de grano, GPB: grado de panza blanca. En azul correlaciones positivas y en rojo correlaciones negativas. Significación estadística: *** $p < 0,001$, ** $p < 0,01$ y * $p < 0,05$.

Por otro lado, se obtuvo correlaciones negativas y significativas entre grado de panza blanca y porcentaje de grano entero ($r = -0,65$), relación largo/ancho del grano y ancho del grano ($r = -0,61$) y número de granos llenos por panícula y porcentaje de esterilidad ($r = -0,56$). Esta última asociación está bien establecida dado que un alto número de granos llenos indica que la mayoría de los granos han logrado desarrollarse correctamente y, por lo tanto, el porcentaje de granos estériles (los

que no se han desarrollado) será bajo (Hoshikawa, 1993). Por último, se obtuvo también una correlación negativa y significativa entre peso de mil granos pulidos y porcentaje de grano entero ($r = -0,45$). Ambos parámetros están asociados a la calidad del grano, un peso mayor de mil granos pulidos a menudo correlaciona positivamente con un mayor porcentaje de grano entero, sin embargo, el hecho de que los granos estén más propensos a romperse durante el procesamiento pudo deberse al efecto del estrés hídrico (Zhao *et al.*, 2020).

Relación entre parámetros de color del dosel y el rendimiento.

La escala de color CIELab se basa en un sistema tridimensional donde el componente a^* representa tonalidades de verde a rojo (con valores negativos indicando verde y positivos indicando rojo), mientras que b^* indica tonalidades de azul a amarillo (con valores negativos para azul y positivos para amarillo). Por su parte, la escala CIELuv también mide la percepción del color con componentes L^* para la luminosidad, u^* y v^* que funcionan de manera similar a a^* y b^* en CIELab, pero con una separación del espectro de color para una mayor uniformidad perceptual (Trussell *et al.*, 2005; Buchailot *et al.*, 2019). Estos parámetros de color están estrechamente relacionados con la cantidad de clorofila en las plantas, la cual es un indicador clave del contenido de nitrógeno y la producción de biomasa, factores que a su vez se asocian directamente con el rendimiento del cultivo. Se ha reportado una relación significativa entre el índice de color b^* y la concentración de nitrógeno en las hojas, lo que permite usar mediciones de color como un método no invasivo para estimar el estado de nitrógeno en las plantas (Kefauver *et al.*, 2014). El contenido de clorofila y nitrógeno está directamente relacionado con la capacidad fotosintética de la planta, lo que influye significativamente en su crecimiento y desarrollo, por tanto, la reflectancia medida a través de imágenes digitales y el análisis de color pueden proporcionar datos precisos sobre el crecimiento de las plantas (Kefauver *et al.*, 2014) y la salud de los cultivos (Liu *et al.*, 2010).

Tabla 7. Análisis de correlación de Pearson entre el rendimiento de grano (RG) y parámetros de color Intensidad, Hue (tono), Saturación, Luminosidad, a^* , b^* , u^* y v^* , obtenidos de imágenes RBG capturadas en a 20 líneas de arroz, durante dos temporadas (2021 - 2022 y 2022 - 2023) y en tres estados fenológicos, anthesis (AN), grano lechoso (GL) y grano pastoso (GP).

	2021 – 2022			2022 - 2023		
	AN	GL	GP	AN	GL	GP
Intensidad	0,287	0,316	0,286	0,274	0,006	-0,148
Hue	-0,036	-0,286	-0,364	-0,108	0,149	0,1179
Saturación	-0,032	-0,468*	-0,473*	-0,244	-0,243	0,2077
Luminosidad	0,251	0,258	0,232	0,237	-0,022	-0,1251
a*	-0,085	0,325	0,315	0,354	0,040	-0,0751
b*	0,131	-0,528*	-0,523*	-0,160	-0,214	0,0099
u*	-0,048	0,076	0,052	0,360	-0,026	-0,0785
v*	0,170	-0,519*	-0,516*	-0,193	-0,193	0,0102

* Correlaciones significativas para $p < 0,05$.

Independientemente del potencial que tienen las imágenes RGB para el monitoreo de las plantas. En este estudio se obtuvo, en general, correlaciones (r) bajas y no significativas con el rendimiento (Tabla 7). Solamente en la temporada 2021 / 2022 y en las etapas de llenado de grano, se obtuvieron correlaciones estadísticamente significativas entre el rendimiento y saturación, b^* y v^* , las que variaron entre -0,468 y -0,528, indicando una relación inversa con respecto al rendimiento. Se ha reportado que una mayor saturación del cultivo durante la fase de llenado de grano podría estar asociada con un menor rendimiento (Rodríguez *et al.*, 2020). De igual modo, la asociación entre el rendimiento y b^* indica que el componente amarillo-azul tiene una relación inversa con el rendimiento, efecto similar al observado en relación entre v^* y rendimiento durante esta fase.

CONCLUSIONES

- Los genotipos evaluados tuvieron diferente desempeño en condiciones de déficit hídrico, con diferencias significativas en días de floración, altura de planta, porcentaje de grano entero, peso de mil granos, número de granos totales por panícula, número de granos llenos por panícula, porcentaje de esterilidad y grado de panza blanca del grano.
- Se presentaron diferencias significativas entre las temporadas en días de floración, porcentaje de grano entero, número de granos totales por panícula, porcentaje de esterilidad y grado de panza blanca.

- El rendimiento de grano no presentó diferencias significativas entre los genotipos, ni entre temporadas, pero sí hubo una disminución del rendimiento en comparación con el potencial en condiciones de cultivo tradicional bajo inundación.
- Los índices de color obtenidos desde imágenes RGB presentaron bajas correlaciones y no significativas en relación con el rendimiento.
- Se requiere evaluar una mayor cantidad de genotipos de arroz en condiciones de déficit hídrico con el fin de identificar aquellos con potencial para el desarrollo de variedades adecuadas para estas condiciones.

REFERENCIAS

1. Al-Naggar, A. M., Shabana, R., Zayed, B. A. and El-Kallawy, H. 2020. Performance of some rice genotypes under normal and water stress conditions. *J. Plant. Prod.* 11(6): 655-666.
2. Araus, J. L., and Cairns, J. E. 2014. Field high-throughput phenotyping: the new crop breeding frontier. *Trends. Plant. Sci.* 19(1): 52-61.
3. Berni, J., Zarco, P., Sepulcre, P., Fereres, E., and Villalobos, F. 2009. Mapping canopy conductance and CSWI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery. *Remote. Sens. Environ.* 113: 2380-2388.
4. Bouman, B. A. M., Lampayan, R. M., and Tuong, T. P. 2007. Water management in irrigated rice: Coping with water scarcity, 123. International Rice Research Institute. 45-78.
5. Boyer, J. S. 1982. Plant productivity and environment. *Science.* 218(4571): 443-448.
6. Buchailot, M. L., Kefauver, S. C., Anez-Serrano, A., and Araus, J. L. 2019. Estimation of nitrogen and chlorophyll contents in rice from remote sensing data and its relationship with biomass and yield. *Plant Methods.* 15(1): 21.
7. Camino, C., Zarco-Tejada, P., and González-Dugo, V. 2018. Effects of heterogeneity within tree crowns on airborne -quantified SIF and the CWSI as indicators of water stress in the context of precision agriculture. *Remote Sensing.* 10(4): 1-18.
8. Casadesús, J., Kaya, Y., Bort, J., Nachit, M. M., Araus, J.L., Amor, S., Ferrazzano, G., Maalouf, F., Maccaferri, M., Martos, V., Ouabbou, H., and Villegas, D. 2007. Using vegetation indices derived from conventional digital

- cameras as selection criteria for wheat breeding in water-limited environments. *Ann. Appl. Biol.* 150(2): 227–236.
9. Ceccarelli, S. and Grando, S. 2007. Decentralized-participatory plant breeding: an example of demand driven research. *Euphytica*. 155: 349–360.
 10. Ceccarelli, S., Grando, S., Baum, M., and Udupa, S. M. 2004. Breeding for drought resistance in a changing climate. In *Challenges and Strategies for Dryland Agriculture*. 167–190.
 11. Chaudhary, R. C., Nanda, J. S., y Tran, D. V. 2003. Guía para identificar las limitaciones de campo en la producción de arroz. FAO, 45-65.
 12. Chen, Z., Xing, Y., Wu, L., and Song, W. 2011. Quantification of Rice Chalkiness by Using Image Analysis and Their Potential Applications. *Plant Cell*. 34(5): 1912-1924.
 13. Cuevas, R. P., Daygon, V. D., Corpuz, H. M., Reinke, R. F., Waters, D. L. E., and Fitzgerald, M. A. 2016. Melting the secrets of aroma in rice. *J. Sci. Food Agr.* 96(5): 1344-1351.
 14. El Sabagh, A., Hossain, A., Barutçular, C., Islam, M. S., and Saneoka, H. 2021. Genetic diversity of selected rice genotypes under water stress conditions. *Plants*. 10(1): 27.
 15. Fan, J., Wang, Y., and Zheng, B. 2000. Impact of white belly and chalkiness on rice grain quality. *J. Cereal Sci.* 31(1): 33-38.
 16. FAOSTAT 2022. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (Consulta 28 julio 2023).
 17. Fitzgerald, M. A., McCouch, S. R., and Hall, R. D. 2009. Not just a grain of rice: the quest for quality. *Trends Plant Sci.* 14(3): 133-139.
 18. Gao, H., Xu, X., Huang, L., and Zhang, H. 2020. Genotypic variation and environmental impact on rice grain yield and quality. *Rice Sci.* 27(1): 23-30.
 19. Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H., and Veloso-Águila, D. 2019. The Central Chile Mega Drought (2010-2018): A Climate dynamics perspective. *Int. J. Climatol.* 40(1): 1-19.
 20. Habash, D. Z., Kehel, Z., and Nachit, M. 2009. Genomic approaches for designing durum wheat ready for climate change with a focus on drought. *J. Exp. Bot.* 60: 2805-2815.

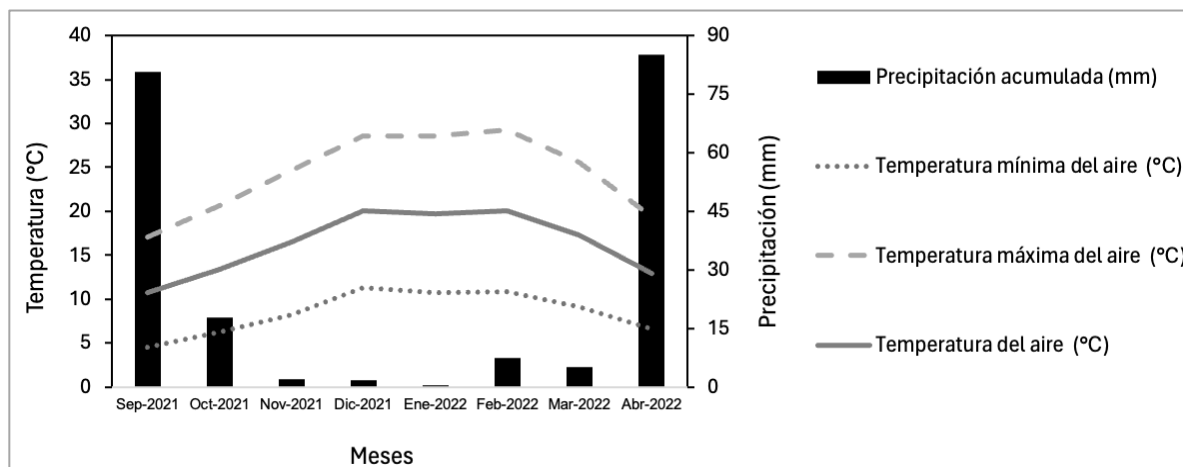
21. Hoshikawa, K. 1993. Growth of the rice plant: An anatomical viewpoint. *Nosan Gyoson Bunka Kyokai*. 4: 112-145.
22. Juliano, B. O. 2007. Rice chemistry and technology. *American Association of Cereal Chemists*. 10: 210-240.
23. Kefauver, S. 2019. Curso Herramientas para fenotipado: Sensores e imágenes. Universidad de Talca.
24. Kefauver, S. C., Vicente, R., Vergara-Díaz, O., Fernández-Gallego, J. A., Nieto-Taladriz, M. T., and Araus, J. L. 2014. Comparative remote sensing of maize and wheat for monitoring nitrogen content and biomass. *Field Crop. Res.* 164: 69-80.
25. Kefauver, S.C., Vicente, R., Vergara-Díaz, O., Fernández-Gallego, J.A., Kerfal, S., Lopez, A., Melichar, J.P.E., Serret Molins, M.D., and Araus, J.L. 2017. Comparative UAV and field phenotyping to assess yield and nitrogen use efficiency in hybrid and conventional barley. *Front. Plant Sci.* 8: 1-15.
26. Khush, G. S., and Virk, P. S. 2005. Rice breeding: achievements and future strategies. *Crop Improvement Journal*. 23(2): 95-107.
27. Li, L., Zhang, Q., and Huang, D. 2014. A review of imaging techniques for plant phenotyping. *Sensors*. 14(11): 20078-20111.
28. Liang, J., Zhang, H., and Liu, J. 2019. Growth and yield performance of rice genotypes under varying water conditions. *Int. J. Agric. Biol.* 21(4): 699-704.
29. López, J. P., Martínez, C. A., & Torres, F. J. 2018. Calidad de grano en arroz: Impacto de factores genéticos y ambientales. *Ciencia Technol. Alime*. 38(2): 123-130.
30. Paredes, M., Becerra V. 2015. Producción de arroz: Buenas prácticas agrícolas (BPA). Chillán: Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. No. 306.
31. Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G. (eds.) 2021. 100 años del cultivo del arroz en Chile en un contexto internacional. 1920-2020. Tomo II. Libro INIA N° 40, 396 p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Chillán. Chile.
32. Peng, S., Khush, G. S., & Cassman, K. G. 1999. Yield potential trends of tropical rice since the release of IR8 and the challenge of increasing rice yield potential. *Crop Sci.* 39(6): 1552-1559.
33. Potters, G., Pasternak, T. P., Guisez, Y., Palme, K. J., Jansen, M. A. 2007. Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble?. *Trends plant sci.* 12(3): 98-105.

34. Ramírez, E., R. Alfonso, I. Franco y S. Rodríguez. 2002. Fenología de la planta de arroz bajo condiciones de estrés hídrico en diferentes fenofases y durante todo el ciclo. *Rev. Cub. Arroz* 4: 64-70.
35. RStudio Team 2020. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA
36. Sabagh, A., Islam, M. S., Barutçular, C., and Saneoka, H. 2021. Evaluation of rice genotypes for growth and yield under normal and water stress conditions. *MDPI Plants*. 10(1): 27.
37. Shao H. B., Chu L. Y., Lu Z. H. and Kang CM 2007. Primary antioxidant free radical scavenging and redox signaling pathways in higher plant cells. *Int. J. Biol. Sci.* 4(1): 8–14.
38. Shao, H. B., Chu, L. Y., Jaleel, C. A., and Zhao, C. X. 2008. Water-deficit stress induced anatomical changes in higher plants. *C. R. Biol.* 331(3): 215-225.
39. Singh, R. K., Mohapatra, T., and Sharma, S. D. 2017. Genotypic variation and its impact on yield and quality traits in rice. *Field Crop. Res.* 210: 32-40.
40. Smith, C. W., Dilday, R. H., and Lee, F. N. 2019. Rice: Origin, history, technology, and production. John Wiley & Sons. 10: 320-350.
41. Trussell, H. J., Saber, E., and Vrhel, M. J. 2005. Color Image Processing: Methods and Applications. CRC Press. 6: 140-175.
42. Vaughan, D. A. 1994. The wild relatives of rice: A genetic resources handbook. Manila, Philippines: International Rice Research Institute (IRRI). 3: 55-80.
43. Vaughan, D. A., Morishima, H., and Kadowaki, K. 2003. Diversity in the *Oryza* genus. *Curr. Opin. Plant Biol.* 6(2): 139-146.
44. Vergara-Diaz, O., Zaman-Allah, M.A., Masuka, B., Hornero, A., Zarco-Tejada, P., Prasanna, B.M., Cairns, J-E. and Araus, J.L. 2016. A novel remote sensing approach for prediction of maize yield under different conditions of nitrogen fertilization. *Front. Plant Sci.* 7: 666.
45. Virmani, S. S., Aquino, R. C., and Khush, G. S. 1985. Heterosis breeding in rice (*Oryza sativa* L.). *Theor. Appl. Genet.* 70(1): 123-130.
46. Wang, Y., Zheng, B., and Xu, J. 2018. Effects of temperature and water stress on rice sterility. *Agr. Sci. China.* 9(5): 1234-1242.

47. Wu, W., Zheng, X., Lu, H., and Chen, Q. 2010. Stability of rice grain dimensions in different environments. *Plant Sci. J.* 29(2): 111-118.
48. Zhao, C., Qiao, Y., and Zhang, Q. 2020. Performance of rice genotypes under water stress and normal conditions. *J. Integr. Agri.* 19(5): 1230-1238.
49. Zhou, H., Yu, S., and Yu, Y. 2015. Genetic analysis of grain shape and weight in rice. *Theor. Appl. Genet.* 128(6): 1129-1138.

APÉNDICES

APÉNDICE 1. Temperatura mínima, máxima y promedio y precipitación acumulada en la estación experimental del arroz en San Carlos, Chile, durante la temporada 2021 – 2022.



APÉNDICE 2. Temperatura mínima, máxima y promedio y precipitación acumulada en la estación experimental del arroz en San Carlos, Chile, durante la temporada 2022 – 2023.

