

UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL MAR
ESCUELA CIENCIAS AGRARIAS
LICENCIATURA EN AGRICULTURA ALTERNATIVA

**Determinación de la tolerancia a salinidad de líneas mutantes de arroz (*Oryza sativa* L.)
bajo condiciones de invernadero en Barva, Heredia**

**Trabajo final de graduación bajo la modalidad de tesis de grado sometida a consideración
del Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional
para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Agronomía**

Bach. Abigail Chavarría Salas

**Heredia, Costa Rica
2022**

UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL MAR
ESCUELA DE CIENCIAS AGRARIAS
LICENCIATURA EN AGRICULTURA ALTERNATIVA

**Determinación de la tolerancia a salinidad de líneas mutantes de arroz (*Oryza sativa* L.)
bajo condiciones de invernadero en Barva, Heredia.**

Por

Bach. Abigail Chavarría Salas

Tutor:

Dr. Rafael Orozco Rodríguez

Asesores:

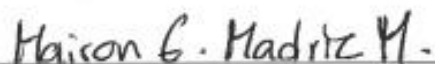
Dr. Roger Muñoz Hernández

Lic. Juan Félix Arguello Delgado

Heredia, Costa Rica, 2022

**Trabajo final de graduación presentado como requisito parcial para optar al grado de
Licenciatura en Ingeniería en Agronomía**

Tribunal Examinador



M. Sc. Mairon Madriz Martínez

Representante del Decanato de Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar



M. Sc. José Alonso Calvo Araya

Representante Dirección de la Escuela de Ciencias Agrarias



Dr. Rafael Orozco Rodríguez

Director de Tesis



Dr. Roger Muñoz Hernández

Asesor



Lic. Juan Félix Arguello Delgado

Asesor



Bach. Abigail Chavarría Salas

Postulante

Dedicatoria

A Dios por guiarme en el buen camino.

A mis padres, Milder Chavarría Arce y Yalile Salas Rodríguez por sus consejos, dedicación, brindarme la oportunidad y apoyo de crecer profesionalmente e inculcarme el amor por el campo y el valor de nuestros productores.

A mi hermana Joselyn Chavarría Salas por siempre motivarme cada día y ser mi apoyo incondicional.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor Dr. Rafael Orozco Rodríguez y asesores Dr. Roger Muñoz Hernández y Lic. Juan Félix Arguello Delgado por su paciencia, dedicación y guía del presente trabajo final de graduación.

También quiero agradecer a la Escuela de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional por mi formación profesional, muy especialmente al equipo de trabajo del Programa de Biotecnología Vegetal y Recursos Genéticos para el Fitomejoramiento (BIOVERFI) por brindar sus instalaciones y recursos materiales para llevar a cabo el proceso de la investigación.

Al programa de fondos para el fortalecimiento de las capacidades estudiantiles (FOCAES), por haber aportado parte de la ayuda financiera necesaria para la ejecución de la investigación.

Al profesor M. Sc. Alejandro Vargas Martínez por la ayuda en el diseño experimental y análisis estadístico de los datos.

A mis colegas M. Sc. José Alonso Calvo Araya, M. Sc. Mairon Madriz Martínez, Lic. Alexis Fernández Acuña y la Ing. Karina Mena Cordero por sus consejos y apoyo brindado en las etapas de este proyecto de investigación.

Por último, quiero agradecer a cada una de las personas que me apoyaron y animaron. En especial a mi familia que siempre ha estado ahí con palabras de apoyo.

Muchas gracias a todos.

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar el comportamiento de cinco líneas mutantes de arroz (*Oryza sativa* L.) al estrés salino mediante variables morfoagronómicas para clasificarlas según grado de tolerancia en condiciones de invernadero. Las líneas mutantes se expusieron al estrés salino en las dos etapas fenológicas más sensibles (vegetativa y reproductiva) durante un periodo de 12 días en cada etapa a una conductividad eléctrica constante de $10 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Se utilizó un sistema hidropónico y la solución nutritiva descrita por Yoshida *et al.* (1976), para el crecimiento de plantas de arroz. La primera fase estuvo constituida por 72 plantas por línea mutante y el testigo para un total de 432 plantas, se midió antes y después del estrés salino la altura de la planta, longitud de la raíz, el número de hojas, el grado de tolerancia. En la segunda fase se contó con 15 plantas por tratamiento, se midió la altura de la planta, el vigor vegetativo, la biomasa total producida, el número de panícula por planta, la longitud de la panícula, el porcentaje de esterilidad, el peso de 100 granos y la producción promedio. En el primer periodo de estrés salino dos de las líneas mutantes (400-04 y 400-14) mostraron deterioro en la primera semana, tanto a nivel radicular como foliar causando pérdida total de las plantas en ambos tratamientos. En las tres líneas mutantes restantes (400-13, 400-29 y 400-15) la altura de la planta, longitud de la raíz y número de hojas no presentaron diferencias estadísticas significativas entre estos y el testigo. El crecimiento general de las líneas mutantes antes y después del estrés salino tampoco se vio afectando. En cuanto a la escala de salinidad aplicada se encontró plantas muertas durante el periodo de estrés salino en las líneas mutantes y el testigo. No se evidenciaron materiales altamente tolerantes, pero si tolerantes, en las líneas mutantes 400-29 y 400-13 y con un menor porcentaje en la línea 400-15 y el testigo. Todas las líneas mutantes incluyendo el testigo CR 5272 mostraron ser moderadamente tolerantes según la escala utilizada. En el segundo periodo de estrés salino las líneas mutantes y el testigo tuvieron porcentajes de esterilidad muy elevados y por ende la producción promedio se vio afectada, sin embargo, en menor medida en las líneas mutantes. Se concluye en esta investigación que los mutantes candidatos tienen una tendencia de tolerancia a la salinidad.

Palabras clave: cultivo hidropónico, estrés salino, conductividad eléctrica.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the response of five rice (*Oryza sativa* L.) mutant lines to salt stress using morpho agronomic variables to classify them according to their degree of tolerance under greenhouse conditions. The mutant lines were exposed to salt stress at the two most sensitive phenological stages (vegetative and reproductive) for a period of 12 days in each stage at a constant electrical conductivity of 10 dS·m⁻¹. A hydroponic system and the nutrient solution described by Yoshida et al. (1976) were used for the growth of rice plants. The first phase, consisted of 72 plants per mutant line and the control for a total of 432 plants; plant height, root length, number of leaves, and degree of tolerance were determined before and after salt stress. In the second phase, there were 15 plants per treatment, plant height, vegetative vigor, total yield biomass, number of panicles per plant, panicle length, percentage of sterility, weight of 100 grains and average yield were measured. In the first period of salt stress, two of the mutant lines (400-04 and 400-14) showed weakening in the first week, both at the root and foliar levels, causing total plant loss in both treatments. In the remaining three mutant lines (400-13, 400-29 and 400-15), plant height, root length and number of leaves showed no significant statistical differences between them and the control. The overall growth of the mutant lines before and after salt stress was also not affected. Regarding the salinity scale used, dead plants were found during the salt stress period in the mutant lines and the control. There was no evidence of highly tolerant materials, but there were tolerant materials in the mutant lines 400-29 and 400-13, and with a lower percentage in line 400-15 and the control. All the mutant lines including the control CR 5272 were moderately tolerant according to the scale. In the second period of salt stress, the mutant lines and the control had very high sterility percentages and therefore the average production was affected, however, to a lesser extent in the mutant lines. It is concluded in this research that the candidate mutants have a trend of tolerance to salinity.

Key words: hydroponic culture, salt stress, electrical conductivity.

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiv
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.1.1 Objetivo general	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Generalidades del cultivo del arroz	4
2.2 Fenología.....	4
2.3 Requerimientos agroecológicos	5
2.5 Variedad CR 5272	6
2.7 Como se mide la salinidad	8
2.8 Salinidad en Costa Rica.....	9
2.9 Efecto de la salinidad en las plantas.....	9
2.10 Salinidad en arroz.....	9
2.11 Mecanismos de tolerancia a la salinidad en arroz	11
2.12 Origen de la salinidad en los suelos	12
2.13 Técnica de inducción de mutantes	13
2.14 Valoración a nivel hidropónico	14
3. METODOLOGÍA.....	15
3.1 Localización del estudio.....	15
3.2 Material genético.....	15
3.3 Tratamientos.....	15
3.4 Fase 1: Determinación del grado de tolerancia a la salinidad en fase de plántula	16

3.4.1 Siembra.....	16
3.4.2 Manejo	17
3.4.3 Diseño experimental	17
3.4.4 Periodo de estrés salino	17
3.5 Variables evaluadas antes (21 dds) y después del estrés salino (33 dds).....	17
3.5.1 Altura de la planta.....	17
3.5.2 Longitud de la raíz.....	18
3.5.3 Número de hojas.....	18
3.5.4 Grado de tolerancia.....	18
3.7 Fase II: Clasificación de líneas mutantes de arroz al estrés salino en fase reproductiva.....	20
3.7.1 Siembra.....	20
3.7.2 Manejo.....	20
3.7.3 Diseño experimental.....	20
3.7.4 Periodo de estrés salino	21
3.8 Variables evaluadas en la selección de genotipos promisorios.....	21
3.8.1 Altura de la planta.....	21
3.8.2 Vigor vegetativo	21
3.8.3 Biomasa total producida	22
3.8.4 Número de panículas por planta	22
3.8.5 Longitud de la panícula	22
3.8.6 Porcentaje de esterilidad.....	22
3.8.7 Peso de 100 granos	23
3.8.8 Producción	23
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
4.1 Fase I: Determinación del grado de tolerancia a la salinidad en estado de plántula.....	25
4.1.1 Altura de la planta	25
4.1.2 Longitud de la raíz.....	29
4.1.3 Número de hojas.....	32
4.1.4 Grado de tolerancia	34

4.2 Fase II: Clasificación de líneas mutantes de arroz al estrés salino en fase reproductiva	
.....	35
4.2.1 Altura de la planta	35
4.2.2 Vigor vegetativo	37
4.2.3 Biomasa total producida.....	38
4.2.4 Componentes de rendimiento.....	40
4.2.5 Peso de 100 granos llenos	42
4.2.6 Porcentaje de esterilidad.....	43
5.2.7 Producción promedio	44
5. CONCLUSIONES	47
6. RECOMENDACIONES.....	48
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
8. ANEXOS	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Número de productores y hectáreas sembradas según tamaño de finca en el periodo 2019/2020	6
Tabla 2. Clasificación de los suelos según la tolerancia de los cultivos a las sales	8
Tabla 3. Tratamientos para evaluar en invernadero	16
Tabla 4. Criterios de evaluación y selección de los materiales tolerantes de la investigación en estado de plántula.....	18

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del área experimental disposición de las cajas con las plantas de arroz de cada tratamiento (T) y repetición (R).....	21
Figura 2. Altura promedio de tres genotipos tolerantes a la salinidad y un testigo de arroz, antes y después de ser sometidos a estrés salino. Las barras de error representan el error estándar.	26
Figura 3. Altura promedio de los materiales evaluados antes y después del estrés salino. Letras distintas indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$). Las barras de error representan el error estándar.	27
Figura 4. Longitud promedio de raíz de tres genotipos tolerantes a la salinidad y un testigo de arroz, antes y después de ser sometidos a estrés salino. Las barras de error representan el error estándar.	29
Figura 5. Longitud promedio de la raíz de los materiales evaluados antes y después del estrés salino. Letras distintas indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$). Las barras de error representan el error estándar.....	30
Figura 6. Número de hojas promedio de tres genotipos tolerantes a la salinidad y un testigo de arroz, antes y después de ser sometidos a estrés salino. Las barras de error representan el error estándar.	32
Figura 7. Número de hojas promedio de los materiales evaluados antes y después del estrés salino. Letras distintas indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$). Las barras de error representan el error estándar.....	33
Figura 8. Nivel de tolerancia de los materiales, expresado en porcentaje. El gráfico compara el nivel de tolerancia a la salinidad de cada uno de los materiales evaluados, una vez finalizado el estrés salino.	35
Figura 9. Crecimiento promedio de tres genotipos tolerantes a la salinidad y un testigo de arroz, antes y después de ser sometidos a estrés salino. Las barras de error representan el error estándar.	36

Figura 10. Número de macollas promedio de tres genotipos tolerantes a la salinidad y un testigo de arroz, antes y después de ser sometidos a estrés salino. Letras distintas indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$). Las barras de error representan el error estándar.	37
Figura 11. Número de macollas promedio de los materiales evaluados antes y después del estrés salino. Letras distintas indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$). Las barras de error representan el error estándar.....	38
Figura 12. Biomasa total promedio de los materiales evaluados, expresado en gramos (g). El gráfico compara la biomasa promedio producida para cada uno de los materiales. Las barras de error representan el error estándar.	39
Figura 13. Componentes de rendimiento evaluados. El gráfico compara los componentes de rendimiento de los genotipos evaluados. Letras distintas indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$).	41
Figura 14. Peso promedio en gramos de 100 granos llenos de los materiales evaluados. El gráfico compara el peso promedio de 100 granos llenos de los materiales. Las barras de error representan el error estándar.	42
Figura 15. Porcentaje de esterilidad promedio de los materiales evaluados. Las barras de error representan el error estándar.	43
Figura 16. Producción promedio para cada uno de los materiales evaluados. El gráfico compara el rendimiento total de los materiales. Las barras de error representan el error estándar.	44

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Ubicación satelital mediante el programa informático Google Earth del invernadero en la Finca experimental Santa Lucia utilizado para el desarrollo de la investigación	60
Anexo 2. Resultados de la evaluación del crecimiento promedio de los materiales de arroz en estado de plántula. Comparación de medias DGC (Alfa=0,05). Letras distintas indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$).	60
Anexo 3. Longitud radicular promedio de las plántulas de arroz.Comparación de medias DGC (Alfa=0,05). Letras distintas indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$).	61
Anexo 4. Producción promedio de hojas de las plantas de arroz en estado de plántula.Comparación de medias DGC (Alfa=0,05). Letras distintas indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$).	61
Anexo 5. Evaluación del crecimiento aéreo de las plantas de arroz en estado adulto.....	62
Anexo 6. Evaluación del vigor vegetativo en los materiales utilizados en etapa adulta. Comparación de medias DGC (Alfa=0,05). Letras distintas indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$).	63
Anexo 7. Producción de biomasa total de las plantas de arroz sometidas a dos periodos de estrés, expresado en gramos (g).	64
Anexo 8. Longitud de la panícula promedio en las plantas de arroz. Comparación de medias DGC (Alfa=0,05). Letras distintas indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$).	64
Anexo 9. Producción de granos promedio por panícula en las plantas de arroz. Comparación de medias DGC (Alfa=0,05). Letras distintas indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$).	65
Anexo 10. Resultados para peso de 100 granos llenos de las plantas de arroz.	65
Anexo 11. Porcentaje de esterilidad de cada uno de los materiales.	66
Anexo 12. Producción promedio de cada uno de los materiales.	66
Anexo 13. Tanque de almacenamiento tricapa para la solución nutritiva, ubicado a 1.5 metros de altura.	66

Anexo 14. A. Láminas de estereofón para soporte de plantas, B. Soporte de semillas para germinación en pots con lámina de estereofón y malla nylon, C. Esponja hidropónica como soporte de plantas.....	67
Anexo 15. A. Medición de cada solución madre. B. Preparación de solución nutritiva Yoshida en tanque de almacenamiento.	67
Anexo 16. A. Pots para el proceso de germinación de semillas de cada material a evaluar, B. Bandejas utilizadas para el desarrollo del cultivo.....	68
Anexo 17. Medición de la altura de la planta desde la base del tallo a la punta de la hoja más alta.	68
Anexo 18. Medición de la raíz de la plántula de arroz, desde la base del tallo hasta la punta de la raíz más larga.	69
Anexo 19. Selección de plántulas de arroz para conteo de hojas.	69
Anexo 20. Blanqueamiento de las puntas del arroz en estado de plántula sometido a estrés salino.	70
Anexo 21. Materiales sometidos al primer periodo de estrés salino.	70
Anexo 22. Materiales sometidos a estrés en la etapa reproductiva.	71
Anexo 23. A. Cochecha manual de cada material, B. Muestras del material vegetal para determinar biomasa total producida.....	71

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) es considerado uno de los principales cultivos de importancia económica a nivel mundial, siendo un alimento básico en la población (González *et al.* 2020). En el mundo, alrededor de 3.500 millones de personas dependen de este grano para suplir más del 20,0% de sus calorías diarias (Khush, 2013). A medida que aumenta el consumo de este, también aumenta su importancia como cultivo para el mercado mundial (Dugan, 2015).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en el año 2017, estimó que la agricultura tendrá que producir un 50,0% más de alimentos; por lo cual se pronostica un incremento mundial en la demanda de arroz. Según el informe sobre los mercados mundiales de la alimentación presentado por la FAO (2020), en el 2019 la producción fue de 500,6 millones de toneladas (t) y en el 2020 pasó a 508,7 millones de t. Este aumento continuará y por lo tanto será necesario aumentar áreas productivas para hacer frente a este desafío (Khush, 2013).

A nivel nacional durante el periodo comprendido entre el 2019 y 2020 se sembraron 33.048 hectareas (ha), de las cuales 22.960 corresponden a la primera siembra y 10.088 ha a la segunda, distribuidas en 5 regiones socioeconómicas: Chorotega, Brunca, Pacífico Central, Huetar Norte y Huetar Atlántica. En la región Chorotega se produce el 59,0% del total del arroz del país, seguido por la región Brunca con un 17,0% de la producción, mientras que en tercer lugar lo ocupa la región Huetar Norte con un 8,0% (Corporación Arrocera Nacional [CONARROZ], 2020).

El consumo per cápita de arroz en Costa Rica es de 47,20 kg. Para el período del 2019 y 2020, el 41,0% del consumo se cubrió con arroz nacional, mientras que el arroz importado cubrió el 59,0% restante (CONARROZ, 2020).

La producción de alimentos según la FAO (2017), está siendo afectada por el cambio climático provocando una caída generalizada en el rendimiento de los cultivos dentro de los factores asociados a esta caída están los cambios de temperatura de la superficie del mar, la circulación oceánica, las olas y la concentración salina.

El cultivo de arroz, se encuentra sujeto a diferentes tipos de estreses entre ellos destaca el abiótico el cual reduce el crecimiento y rendimiento, siendo la salinidad de los suelos uno de los principales desafíos para este cultivo (Shahbaz & Ashraf, 2013). A nivel nacional, actualmente existen zonas productoras propensas o que están siendo afectadas por esta condición, como lo son

Guanacaste y Parrita; debido a sus condiciones favorables: baja precipitación, cercanía y altura sobre el nivel del mar (Agüero, 2018).

De acuerdo con Manchanda & Garg (2008), las áreas afectadas naturalmente por la salinidad se encuentran ampliamente en áreas áridas y semiáridas, sectores que pueden estar siendo afectados y no son fáciles de determinar por presentarse en el subsuelo, donde no están asociados con el agua subterránea o con el aumento de las capas freáticas. Además, prácticas agrícolas de suelo inadecuadas y el mal manejo del agua para el riego permite la movilidad de las sales dentro del suelo y el transporte de las mismas a nuevos sitios (Piedra y González, 2013).

Una presencia excesiva de sales causa en las plantas estrés osmótico e iónico debido a acumulación de sales en el exterior de las raíces y en el interior de las células vegetales, (Saeed, 2018), dificultando por lo tanto la extracción de agua por las raíces de la planta, afectando la productividad del cultivo y por ende la rentabilidad del agricultor (Hussain *et al.* 2018).

La extensión global de la tierra afectada por sal de origen natural y/o inducida por el hombre fue calculada por Wicke *et al.* (2011), en donde encontraron alrededor de 1.128 millones de hectáreas de las cuales los suelos salinos figuran el 60,0%, sódico un 26,0% y suelos salinos-sódicos un 14,0%. La salinidad, representa uno de los porcentajes más altos, afectando la producción de alimentos a escala mundial y con tendencia a aumentar a nivel mundial en los próximos años (Piedra y González, 2013). En el caso de Centroamérica, se reportan alrededor de cinco millones de hectáreas afectadas por este problema (Wicke *et al.* 2011).

Para mejorar la productividad y subutilización de los suelos con estos problemas, es necesario buscar alternativas económicas y sostenibles por medio de la identificación y caracterización de nuevos materiales fitogenéticos tolerantes al estrés salino y de esta manera poder utilizar los suelos afectados con esta problemática. Por este motivo, la mejora genética es una alternativa y en este contexto las líneas mutantes de arroz son una herramienta que permite solventar esta necesidad (Pernús & Sánchez, 2015).

Una de las opciones de mejora genética, para minimizar el problema de salinidad en el cultivo del arroz es la técnica de inducción de mutaciones, como medio para aumentar la variabilidad de este cultivo. Lo anterior, se puede lograr en periodos de tiempo muy cortos (minutos), mediante la irradiación de materiales vegetales (generalmente semillas) con rayos gamma (γ) o rayos X (Bado *et al.* 2016). Esta es una técnica que ha sido muy utilizada en los programas de mejoramiento genético en todo el mundo (Reig, 2019). Según (Ahloowalia,

Maluszynski & Nichterlein, 2004)., 432 variedades mutantes de arroz han sido liberadas con características mejoradas en parámetros como altura, desarrollo temprano, mejor rendimiento y calidad de grano, tolerancia a enfermedades y al frío; de estas variedades mutantes 225 (56,0%) fueron inducidas con rayos γ .

Debido a la importancia económica del arroz para el país y la necesidad de nuevas variedades con la capacidad de adaptarse a un ambiente cambiante se desarrolló la siguiente investigación.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

- Evaluar el comportamiento de cinco líneas mutantes de arroz al estrés salino mediante variables morfoagronómicas para clasificarlas según grado de tolerancia en condiciones de invernadero en la Finca Experimental Santa Lucia.

1.1.2 Objetivos específicos

- Comparar la respuesta de cinco líneas mutantes de arroz en estadios tempranos utilizando variables de crecimiento y una escala visual para la determinación del grado de tolerancia a la salinidad.
- Determinar el grado de respuesta al estrés salino de cinco líneas mutantes de arroz en etapa reproductiva utilizando variables morfoagronómicas para la clasificación de los mejores genotipos.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Generalidades del cultivo del arroz

Esta planta generalmente se comporta como una hierba semiacuática anual y pertenece al género *Oryza*. Las dos especies de arroz importantes para la nutrición humana son *O. sativa*, cultivada en todo el mundo y *O. glaberrima*, que se cultiva en partes de África occidental (Dugan, 2015). Hay miles de variedades, incluyendo híbridos naturales y tipos comerciales. Hoy en día, casi todos los productores de arroz dependen de variedades mejoradas (Dugan, 2015).

Este cultivo es una gramínea de tallos redondos y huecos compuestos de nudos y entrenudos, hojas de lámina plana unidas a los tallos por la vaina y su inflorescencia es una panícula (Porras, 2013).

2.2 Fenología

La fenología de este cultivo se divide en tres fases de crecimiento: vegetativa, reproductiva y de maduración. La duración del crecimiento es de tres a seis meses, el cual es determinado principalmente por dos factores, la variedad y el entorno (Dugan, 2015).

Una variedad de arroz de 120 días pasa unos 55 a 60 días en fase vegetativa, 30 días en fase reproductiva, y 30 días en fase de madurez. La primera fase se caracteriza por la emergencia de las hojas en intervalos regulares, un incremento gradual en la altura de la planta y un activo macollamiento, las macollas sin desarrollo de panícula se consideran macollas infértiles. En la fase reproductiva es característico un declinamiento del número de macollas, la emergencia de la hoja bandera, engrosamiento de tallos debido al crecimiento interno de la panícula (la emergencia ocurre unos a 20-25 días luego de la diferenciación del primordio floral), y la floración (anthesis) (Gaibor, 2019).

La fase de maduración varía entre 15 a 40 días dependiendo de la temperatura. Inicia posterior que el ovario ha sido fertilizado y el grano comienza a crecer, incrementa tamaño, peso, almidón y azúcares que se translocan desde la hoja bandera, vainas y macollas donde fueron acumulados en la fase vegetativa (Olmos, 2007).

2.3 Requerimientos agroecológicos

Es cultivado en una gran variedad de condiciones ambientales, siendo las zonas húmedas del trópico o climas con temperaturas altas las más idóneas para su siembra. En Costa Rica puede ser cultivado desde el nivel del mar hasta los 1.000 msnm. La adecuada precipitación diaria durante el periodo de establecimiento del cultivo hasta el llenado del grano es de 10,0 mm³ con una radiación solar de 250,0 a 350,0 cal·cm⁻²·día⁻¹ (Tinoco y Acuña, 2009). Es importante que la época de siembra no coincida con fuertes vientos que afecten las hojas y cause aborto en las flores. Una humedad relativa superior a 80,0% es lo adecuado, además con respecto a las temperaturas óptimas de este cultivo van a variar dependiendo de la etapa fenológica en que se encuentre, generalmente se deben encontrar en un rango de 25,0 a 33,0°C (Tinoco y Acuña, 2009).

2.4 Importancia del cultivo de arroz en Costa Rica

El arroz uno de los cultivos de mayor importancia económica a nivel nacional. En nuestro país es fundamental en las dietas de los costarricenses (Piedra & González, 2015). Para el periodo del 2019 al 2020, el área total cultivada fue de 33.048 ha en donde la Región Chorotega se mantuvo como la región de mayor área sembrada con 16.802 ha, en segundo lugar, se ubica la región Brunca con 6.721 ha, seguido por la Región Pacífico Central con 5.497 ha, Región Huetar Norte con 3.804 ha y por último Huetar Atlántica con 225 ha. Con un rendimiento promedio agrícola nacional de 4,5 t·ha⁻¹, con un consumo per-cápita de 47,20 y un promedio mensual de 19.998 toneladas métricas (tm) (CONARROZ, 2020).

Para el período 2019-2020, el 41,0% del consumo se cubrió con arroz nacional, mientras la cantidad restante se cubrió con importaciones. Durante el período ingresaron al país 65,252 tm de arroz del desbaste (CONARROZ, 2020).

La producción de este grano básico es realizada mayoritariamente por productores denominados micro/pequeño (79,0%), mientras que el 16,0% y el 5,0% corresponde a medianos y grandes productores respectivamente, en donde el método de siembra seco es el más empleado ya que cerca del 78,0% de ellos lo utilizan y el método de riego solo representa aproximadamente el 22,0% (CONARROZ, 2018).

En el período 2019-2020, participaron en la siembra 497 productores, agrupados en cuatro estratos, distribuidos de la siguiente forma: Micro: hasta 10,0 ha, Pequeño: de 10,01 ha a 50,0 ha, Mediano: de 50,01 ha a 200,0 ha y Grande: más de 200 ha. En la tabla 1 se detalla el número de productores y las hectáreas sembradas en cada uno de los cantones arroceros (CONARROZ, 2020).

Tabla 1. Número de productores y hectáreas sembradas según tamaño de finca en el periodo 2019/2020

Estrato	ha	%	Productores (cantidad)	%
Hasta 10 ha	1.091	3,0	186	37,0
De 10.01 a 50 ha	4.525	14,0	187	38,0
De 50.01 a 200 ha	8.122	25,0	88	18,0
Más de 200 ha	19.311	58,0	36	7,0
Total	33.048	100	497	100

Fuente: (CONARROZ, 2020).

En este período CONARROZ (2020) reporta que la variedad más utilizada fue Lazarroz FL de la cual se sembraron 14.952 ha, seguida de Senumisa 20 FL con 6.039 ha, Palmar 18 con 3.694 y Piuta INTA con 3.473 de área sembrada, SEN 220 con un área de 1.179 ha.

2.5 Variedad CR 5272

La variedad CR 5272 fue obtenida en el año 1976 por parte del equipo de mejoramiento genético del Ministerio de Agricultura y Ganadería, en donde evaluaron 1.452 líneas de arroz obteniendo la variedad ya mencionada (Quirós, 1976).

Se caracteriza por ser de porte bajo (96,0 cm), con hojas erectas, poco macollamiento, susceptible a la Piricularia (*Pyricularia grisea* Cooke ex Sacc.), Helminthosporium (*Bipolaris oryzae* (Breda de Haan) Shoemaker); hoja Blanca, Rhizoctonia (*Rhizoctonia solani* Kühn), añublo

bacterial (*Burkholderia glumae* (Kurita & Tabei, 1967)) y a *Sarocladium oryzae* (Sawada) W. Gams & D. Hawksw. y al acame. Florea a los 86 días después de la siembra (dds) y una duración a la cosecha entre 110 a 115 dds. El potencial de producción se encuentra entre 5,5 y 6,0 t ha⁻¹. Con un grano de tamaño medio, buena calidad molinera, el grano quebrado es de 12,0% y un rendimiento de molino de 72,0% medio (Miranda, 2009).

2.6 Salinidad

La salinización es la acumulación de sales en el suelo. Las principales sales que se encuentran en los suelos y que afectan a los cultivos están relacionadas con los cloruros (Cl⁻), sulfatos de sodio (Na₂SO₄), calcio (Ca) y magnesio (Mg), siendo los principales iones fitotóxicos el sodio (Na), los cloruros y los sulfatos (Chinnusamy, Jagendore & Jian-Kang, 2005).

La situación más frecuente de salinidad en los suelos es causada por cloruro de sodio (NaCl). (Piedra y González, 2013) y la sodificación puede ser asociada con la salinización, ya que causa acumulación de sodio y/o sales de sodio en las fases sólidas y/o líquidas del suelo, generando alta proporción de sodio intercambiable dentro del total de las bases intercambiables (FAO, 2016).

La salinización primaria o natural involucra la acumulación de sales a través de procesos naturales debido al alto contenido de sal en el material de origen, sales de agua subterránea que ascienden hacia la superficie mediante la acción capilar, sales depositadas a través de riego con agua salina, sales arrastradas por el viento e incluso depositadas por la lluvia (Hussain *et al.* 2018).

La salinización secundaria o salinización inducida por el hombre es causada por las intervenciones humanas tales como las prácticas de riego inapropiadas, por ejemplo, el riego con agua rica en sal y/o drenaje insuficiente. La sodificación puede ser asociada con la salinización, y es la acumulación de sodio y/o sales de sodio en las fases sólidas y/o líquidas del suelo. El resultado del proceso de sodificación es la alta proporción de sodio intercambiable dentro del total de las bases intercambiables (FAO, 2016).

Existen dos formas de expresar la salinidad de un suelo, por valores de conductividad eléctrica y por la cantidad de sales disueltas en un volumen de solución (g l⁻¹). La conductividad eléctrica (CE) permite medir la concentración total de sales en solución, sin embargo, no determina las sales presentes y se expresa deciSiemens por metro (dS m⁻¹) (Mesa, 2003).

Según el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos (EE. UU.) citado por Allbed & Kumar (2014), los suelos con conductividad del extracto de saturación (EC) > 4 dS·m⁻¹ a 25°C, porcentaje de sodio intercambiable (PSI) <15 y pH (reacción del suelo) <8.5 son referido a suelos salinos. En la siguiente tabla se muestra la clasificación de los suelos de acuerdo con el grado de salinidad.

Tabla 2. Clasificación de los suelos según la tolerancia de los cultivos a las sales

Categorías	CEe promedio (dS·m⁻¹)	Características
No salino	<2	Ningún cultivo es afectado
Ligeramente salino	2 – 4	Afectado los cultivos sensibles
Salino	4 – 8	Afectados muchos cultivos
Fuertemente salino	8 – 16	Posibles sólo cultivos tolerantes
Extremadamente salino	>16	Muy pocos cultivos son posibles

Fuente: (Villafañe, 2000).

Nota: CEe = Conductividad eléctrica equivalente

El contenido en sales del agua produce la pérdida de rendimiento de cultivos y su acumulación en el suelo provoca la pérdida de fertilidad, a medida que aumenta el contenido de sales en la solución del suelo, se incrementa la tensión osmótica y, por tanto, la planta tiene que hacer mayor esfuerzo para absorber el agua. Para evitar este efecto la concentración de sales en el suelo debe controlarse periódicamente e intentar lavar el suelo aprovechando el riego con aguas de baja salinidad (Terrazas, 2019).

2.7 Como se mide la salinidad

La CE y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) miden el contenido de sales en el suelo, los cuales pueden ser obtenidos a través de un análisis de suelo. El límite salino de tolerancia para los cultivos según la clasificación americana de suelos (Soil Taxonomy), es de 2 dS·m⁻¹. El límite establecido por el laboratorio de salinidad de los EE. UU. es de 4 dS·m⁻¹, valores mayores ocasionan toxicidad, afectando la nutrición, el proceso de osmosis en las plantas y en general el funcionamiento normal de las plantas (Saavedra, 2020).

2.8 Salinidad en Costa Rica

En Costa Rica, se han reportado suelos salinos desde los años 70s. Cabalceta y Cordero (1991) realizaron una investigación con suelo salino proveniente de un área denominada La Montaña de la Hacienda Taboga, en Cañas, Guanacaste. Por otra parte, Montes de Oca, Mata y Chaves en 1996 realizaron un estudio de salinidad en la provincia de Guanacaste citando diversos actores que evidencian salinidad en suelo costarricense como Vázquez (1975), que indica que hacia el extremo sureste de la Cuenca Baja del Río Tempisque existe un área considerable con problemas salinos. Además, señala problemas en el Ingenio Taboga con conductividades eléctricas de hasta $1,73 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Autores como Vázquez y Chávez (1976) encontraron en la consolidación El Cortés hasta $12,23 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ en diferentes profundidades de suelo. En 1978 en Ranchos Horizontes en Guanacaste se encontraron valores de salinidad en suelos desde 0,13 hasta $5,65 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

2.9 Efecto de la salinidad en las plantas

Las sales en el agua del suelo pueden inhibir el crecimiento de las plantas por dos razones. En primer lugar, la presencia de sal en la solución del suelo reduce la capacidad de la planta para absorber agua, lo que provoca un bajo crecimiento. Esto se denomina efecto osmótico o efecto de déficit de agua de la salinidad. En segundo lugar, si una cantidad excesiva de sal entran en la planta en la corriente de transpiración, habrá lesiones en las células de las hojas que transpiran y esto puede causar una reducción del crecimiento. Esto se denomina efecto salino-específico o de exceso de iones de la salinidad. Estos efectos de la salinidad tienen un triple efecto: reduce el potencial hídrico, provoca un desequilibrio iónico y toxicidad; esta alteración del estado hídrico conduce a una reducción inicial del crecimiento y a una limitación de la productividad de la planta. El efecto perjudicial se observa a nivel de toda la planta como la muerte de las plantas o la disminución de la productividad. El estrés salino afecta a todos los procesos principales, como la germinación, el crecimiento, y la fotosíntesis, la relación con el agua, el desequilibrio de nutrientes, el estrés oxidativo y el rendimiento (Parihar, Singh, Singh, Singh & Prasad, 2015).

2.10 Salinidad en arroz

Este cultivo muestra variabilidad en su sensibilidad a la salinidad excesiva en las distintas etapas de crecimiento. En general, se considera relativamente tolerante en la etapa de germinación,

macollamiento y hacia la madurez, mientras que en la etapa vegetativa y reproductiva temprana son las más sensibles a la salinidad, afectando directamente el rendimiento (Islam, Islam & Biswas, 2017). Presenta un umbral para la reducción de rendimiento de $3,0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de conductividad eléctrica del suelo (ECe), con una pérdida de rendimiento del 90,0 % a los $10,0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ECe (FAO, 2014).

La respuesta de los cultivos a la salinización depende de la etapa fenológica en que se encuentren, la duración e intensidad del estrés. En el cultivo de arroz la etapa más crítica es la germinación y el estado de plántula, siendo la raíz el órgano directamente afectado por el estrés de salinidad (Hussain *et al.* 2018). Este tipo de estrés se genera debido a la presencia de sales en la solución del suelo, lo cual limita la capacidad de absorción de agua por la planta, afectando el crecimiento. Además, ocurre el proceso llamado exceso de iones de la salinidad (Parihar *et al.* 2015).

Desde un punto de vista fisiológico, además del estrés osmótico, como consecuencia de las altas concentraciones de sales en solución, la salinidad de los suelos produce un estrés iónico como resultado de la alteración de la relación potasio/sodio (K^+/Na^+) en el citosol. Asimismo, produce un incremento de las concentraciones de Na^+ y Cl^- que son perjudiciales para la planta al interferir en la absorción de otros iones, provocando un déficit crítico de nutrientes. Ambos de manera conjunta afectan el crecimiento y el rendimiento de los cultivos (Chinnusamuy *et al.* 2005).

La salinidad tiene un efecto negativo en diferentes atributos morfológicos, bioquímicos y fisiológicos del arroz. Afecta el porcentaje de altura relativa de la planta, el crecimiento total, peso seco de la raíz, peso seco del brote y la materia seca. En cuanto a los atributos bioquímicos afectados por la salinidad se encuentran el contenido de clorofila, contenido de prolina ($\text{C}_5\text{H}_9\text{NO}_2$), contenido de peróxido de hidrógeno (H_2O_2), actividad de peroxidasa (POX), antocianinas, contenido de Na^+ , K^+ y Ca^{++} , además del contenido total de cationes (Saeed, 2018). Los atributos fisiológicos incluyen la tasa de crecimiento relativo, el potencial osmótico, la eficiencia en el uso de la transpiración, la senescencia, la captación de Na^+ , K^+ y Ca^{++} , la captación de cationes totales, la captación de Na^+ / K^+ , la tasa de captación de Na^+ , la tasa de captación de K^+ , relación de captación de Ca^{++} , Na^+ / K^+ (Saeed, 2018).

La tolerancia al estrés por salinidad en plantas es atribuida a su habilidad de evitar la toxicidad por Na^+ y al mantenimiento de la concentración de Ca^{2+} y K^+ . La relación Na^+ / K^+ a menudo se atribuye al efecto de competencia entre los iones Na^+ y K^+ en el medio de desarrollo

de la raíz (Piedra & González, 2015). Sin embargo, es importante tener claro la fase específica susceptible a la sal de una variedad de arroz y así tener una mejor comparación del rendimiento entre las variedades bajo estrés de salinidad (Saeed, 2018). Diversos investigadores como (Cristo, González, Cárdenas y Pérez, 2001), González, González y Ramírez (2002) y Núñez, Mazorra, Martínez, González y Robaina (2007), han trabajado en crear variedades tolerantes a salinidad mejorando los rendimientos de este grano, produciendo plantas de arroz que sobrevivan y produzcan rendimientos económicos en condición de estrés.

2.11 Mecanismos de tolerancia a la salinidad en arroz

Los mecanismos de tolerancia a la salinidad son complejos, comprenden cambios morfológicos y de desarrollo. Según mencionan Reyes, Yanelis, Mazorra, Núñez y Miriam, (2008) los principales procesos fisiológicos que operan las plantas para tolerar el estrés por sales son los siguientes:

1. Ajuste osmótico: Al crecer las plantas en condiciones salinas pueden disminuir el potencial osmótico interno para compensar el externo y mantener la actividad enzimática, el transporte a través del floema y de esta manera se evita la deshidratación y muerte. Además, está ligado a la síntesis de solutos orgánicos que tienen la función de estabilizar la estructura cuaternaria de las proteínas, específicamente en arroz los niveles de prolina han tenido especial atención en estudios de respuesta a estrés salino (González *et al.* 2002).
2. Exclusión de iones a nivel radicular: permite que las plantas toleren concentraciones extracelulares muy elevadas de sal. Responden al estrés salino excluyendo el Na^+ y Cl^- de las hojas (González *et al.* 2002).
3. La retención de iones en las vacuolas: el secuestro del Na^+ en las vacuolas disminuye las concentraciones de sodio en el citosol. Este secuestro depende de antitransportadores Na^+/H^+ y de fosfatasas como H^+ -ATPasa tipo V y H^+ -PPasa, que generan el gradiente necesario para su funcionamiento. El aumento del secuestro de Na^+ en las vacuolas depende de la sobreexpresión de AVP1, una H^+ -pirofosfatasa vacuolar, además mantiene alto el contenido relativo de agua en las hojas (Orosco *et al.* 2018).
4. Eliminación del exceso de sales: esta eliminación se da por medio de glándulas o estructuras especializadas como lo es a través de los pelos vesiculares. Permitiendo eliminar el exceso de

sales, mantiene un balance iónico-osmótico del citoplasma y el buen funcionamiento de permeabilidad en las membranas (Reyes *et al.* 2008).

2.12 Origen de la salinidad en los suelos

La salinidad se puede generar por dos vías, primeramente, se puede dar por forma natural, en áreas que se encuentren cercanas y a una altura sobre el nivel del mar. Además, la intemperización y la existencia de sales también se encuentran dentro de las causas primarias de salinidad, agudizándose en condiciones heterogéneas de microtopografía y las propiedades físico-químicas (Agüero, 2018). Las propiedades del suelos que se pueden ver involucradas y que juegan un papel importante son la textura, la estructura, la porosidad, la permeabilidad, la capacidad de retención de humedad y de intercambio catiónico (Piedra y González, 2013).

Naturalmente las áreas afectadas por salinidad se encuentran ampliamente en áreas áridas y semiáridas, incluyendo áreas que los promedios anuales de precipitación son altos, como en los trópicos secos y templados secos. Existen sectores que pueden estar siendo afectados y ocurre fuera de la vista, en el subsuelo, donde no están asociados con el agua subterránea o con el aumento de las capas freáticas. Esta salinidad se denomina "salinidad transitoria" ya que puede moverse hacia arriba y hacia abajo en el perfil del suelo, dentro y fuera de la zona de la raíz, dependiendo de la temporada (Manchanda & Garg, 2008).

Además de las condiciones climáticas adversas, se deben considerar otros factores que se encuentran asociados en la ocurrencia de salinidad. Factores como aguas salinas subterráneas, tierras bajas cercanas a las costas, los pantanos y las lagunas litorales, así como en las áreas cercanas a minas y bóvedas salinas (Acosta, 2020).

La segunda causa es consecuencia del desarrollo de la sociedad humana o también es conocida como proceso de salinidad antrópica o secundaria. El resultado de las incorrectas prácticas agrícolas del suelo y el mal manejo del agua para el riego, lo cual permite la movilidad de las sales dentro del suelo y el transporte de estas a nuevos sitios (Álvarez, Baños y Otero, 2008).

En la política de recuperación y manejo de estos suelos, el uso de especies y variedades tolerantes al estrés salino se considera como el acontecimiento más pragmático para obtener buenos rendimientos en condiciones salinas y ha recibido especial atención por diferentes investigadores en diversas regiones del mundo. A pesar de que esta temática ha sido objeto de múltiples investigaciones, particularmente en los últimos 30 años, aún no se cumplen todas las

expectativas y se tendrá que seguir trabajando en la mejora genética de los diferentes cultivos para enfrentar este problema (Piedra & González, 2015).

2.13 Técnica de inducción de mutantes

Las mutaciones es un método de mejoramiento genético conocido desde hace mucho tiempo o también conocido como variaciones discontinúas. Se definen como una serie de alteraciones que pueden ocurrir en uno o más genes pudiendo ser transmitidas hereditariamente y con mucha más frecuencia en las plantas. Con el fin de producir cambios cromosómicos y génicos se emplean agentes mutagénicos sobre diversidad de semillas, originando nuevos genotipos. La variabilidad genética que se crea es de gran importancia para el mejoramiento de plantas (Silvera, 2017).

La técnica de inducción de mutaciones ha sido de gran utilidad para generar variabilidad genética durante años a nivel mundial en programas de mejora en especies vegetales. La selección del material va en función de características mejoradas en comparación con variedades locales que destaquen en mayores rendimientos, ciclos más cortos, resistencia a factores estresantes producto del cambio climático y a enfermedades (Haboudane & Jawerth, 2019).

Esta técnica produce modificaciones genéticas con la ventaja de permitir que las plantas resultantes puedan ser comercializadas. Desde los años 60 se han producido un gran número de líneas mutantes abarcando un amplio espectro de especies. Muchas han sido de utilidad en la obtención de nuevas variedades (Reig, 2019).

En el 2007 la base de datos de variedades mutantes (Mutant Varieties Database) del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA)/FAO contaba con más de 2.500 variedades oficialmente liberadas, dentro de éstas 1.600 se generaron después del tratamiento de mutagénesis y el debido proceso de selección. Además, 525 de estas variedades pertenecen a especies de arroz que en su mayoría fueron obtenidas por irradiación con rayos γ (Reig, 2019).

Las variedades de arroz que se cultivan presentan buena adaptación al entorno agroclimático y social, pero aun siendo susceptibles de mejora en cuanto a rendimiento, tolerancia a enfermedades y estrés abiótico, acortamiento del ciclo vegetativo. Un aspecto que siempre es deseable para que el cultivo sea más rentable y beneficie al agricultor es el aumento de rendimiento. Este carácter es complejo y dependiente de factores ambientales, aspectos

fisiológicos, morfológicos con un componente fuertemente genético. Genéticamente el rendimiento del grano está determinado por tres factores: número de granos de las panículas, peso del grano y el número de tallos con panículas producidas por la planta (Reig, 2019).

2.14 Valoración a nivel hidropónico

Como método alternativo al suelo se encuentra el uso de la hidroponía para la evaluación de la tolerancia a la salinidad en arroz, esto debido que la selección en suelo presenta inconsistencias como la variación en las concentraciones y periodos de exposición al estrés, siendo la salinidad muy dinámica y variando tanto horizontal como verticalmente a lo largo del tiempo, por lo que se podría presentar cierto sesgo en los resultados finales y su interpretación (Bado *et al.* 2016). Debido a esto la implementación de sistemas hidropónicos para las evaluaciones se convierten en una solución a dichos inconvenientes.

Investigadores del Instituto Internacional de Investigación del Arroz (IRRI) con sede en Filipinas, establecieron procedimientos para la selección de líneas tolerantes a la salinidad, haciendo énfasis que para poder evaluar la tolerancia en arroz la conductividad eléctrica se debe encontrar mínimo entre 8-10 mmho·cm⁻¹ (Jennings, Coffman y Kauffman, 1981).

El periodo comprendido entre la plántula y la formación de las primeras macollas es una de las etapas más vulnerables del arroz a condiciones salinas, la exposición a la salinidad y su evaluación es de gran importancia en procesos de selección.

3. METODOLOGÍA

Esta investigación se llevó a cabo en dos fases de acuerdo con la etapa fenológica del cultivo del arroz y al empleo de mutantes promisorios al estrés salino:

Fase I: Determinación del grado de tolerancia a la salinidad en estado de plántula.

Fase II: Clasificación de líneas mutantes de arroz al estrés salino en fase reproductiva.

3.1 Localización del estudio

La investigación se llevó a cabo en el invernadero de docencia de la Finca Experimental Santa Lucía (FESL), ubicada en el distrito de Santa Lucía, del Cantón de Barva, provincia de Heredia, Costa Rica, la cual se encuentra en las siguientes coordenadas 84°06'42" Longitud oeste 10°01'24" Latitud norte, a una altura de 1.200 msnm. En esta localidad se presenta una precipitación promedio anual de 2.300 mm y a una temperatura promedio de 20,5°C (Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, 2018). En el anexo 1 se presenta la ubicación satelital del área de estudio.

3.2 Material genético

En ambas fases se utilizaron cinco líneas mutantes de arroz con posible tolerancia a salinidad y reproducidas hasta la tercera generación (M_3). Las mismas fueron seleccionadas en un sistema hidropónico con un medio de cultivo con alta concentración de sal ($14 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$) esta labor la realizó el equipo de trabajo del programa de Biotecnología Vegetal y Recursos Genéticos para el Fitomejoramiento (BIOVERFI) de la Escuela de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional (ECA-UNA). Los mutantes se obtuvieron a partir de semilla de la variedad CR5272 y de una población M_2 , la cual fue irradiada en M_0 con cobalto-60 (^{60}Co) a una dosis de 400 gray (Gy).

3.3 Tratamientos

Se utilizaron 6 tratamientos (Tabla 3) en ambas fases, todos los tratamientos se cultivaron en un sistema hidropónico diseñado por el programa BIOVERFI para la selección de mutantes promisorios de arroz (Fernández, 2020). Se utilizó la solución descrita por Yoshida, Forno, Cock & Gómez (1976) y se prepararon las soluciones salinas siguiendo las especificaciones de Bado

et al. (2016). Todos los tratamientos recibieron la misma conductividad eléctrica 10 dS m^{-1} . (4.78 g L^{-1} de NaCl).

Tabla 3. Tratamientos para evaluar en invernadero

Tratamientos	Material genético
T1	Testigo CR 5272 sin irradiar
T2	400-15
T3	400-04
T4	400-14
T5	400-29
T6	400-13

A continuación, se describe aspectos generales de cada una de las fases.

3.4 Fase 1: Determinación del grado de tolerancia a la salinidad en fase de plántula

3.4.1 Siembra

Se colocaron las semillas de todos los tratamientos en frascos plásticos con dimensiones de $7,0 \text{ cm} \times 7,0 \text{ cm}$ y con espacio interior de $3,0 \text{ cm} \times 3,0 \text{ cm}$ con una capacidad de 320 mL y de color oscuro para evitar proliferación de algas.

Las semillas se colocaron sobre malla de nylon en láminas de estereofón adecuadas al tamaño del frasco. Cada recipiente se llenó de manera que las semillas siempre se mantuvieran en contacto con la solución nutritiva ($2,0$ a $3,0 \text{ mm}$ sobre las semillas).

Las semillas se mantuvieron en oscuridad por ocho días para su germinación y durante este tiempo no se hizo ningún tipo de cambio de solución. Una vez finalizado este periodo se expusieron a luz y se cambió la solución cada dos días. A partir de los 21 días, las plántulas fueron trasladadas a bandejas más grandes para que continuaran con su desarrollo e iniciar el periodo de estrés salino.

3.4.2 Manejo

Una vez transcurrido el período de germinación de las semillas, a todos los tratamientos se les monitoreó el nivel de solución en los frascos plásticos, cuidando en todo momento que la raíz se encontrara en contacto con la solución nutritiva, cuando se realizó el trasplante a cajas del sistema hidropónico se cambió la solución cada dos días.

A la solución nutritiva se le verificó el pH cada dos días manteniéndolo entre 5,0 y 6,0, para esto se utilizó ácido clorhídrico 1 normal (1N) con la ayuda de un pHmetro marca Extech, Modelo EC500.

3.4.3 Diseño experimental

Se utilizó un diseño completo al azar (DCA), para minimizar el efecto de la variabilidad, según Contreras y López (2009).

Estuvo compuesto de 18 unidades experimentales con 40 semillas de cada línea para un total de 720 semillas. En esta fase permanecieron los primeros 21 dds. A los 21 dds se seleccionaron 24 plántulas de cada unidad experimental.

3.4.4 Periodo de estrés salino

Este periodo consistió en someter todos los tratamientos a estrés salino en estado de plántula, iniciando este estrés a los 21 dds, este periodo de estrés tuvo una duración de 12 días (finalizó a los 33 dds) y consistió en modificar la conductividad eléctrica a 10 dS m^{-1} con una cantidad conocida de sal común ($4,78 \text{ g L}^{-1}$).

3.5 Variables evaluadas antes (21 dds) y después del estrés salino (33 dds).

3.5.1 Altura de la planta

Esta variable de crecimiento se determinó midiendo con una regla la longitud de la planta en cm, desde la base del tallo hasta la punta de la hoja. Las mediciones se realizaron antes y después de someterlas a estrés salino (Chavarría, 2011).

3.5.2 Longitud de la raíz

Esta variable se determinó midiendo con una regla la raíz en cm desde la base del tallo hasta la punta de la raíz más larga. Estas mediciones se realizaron antes y después del estrés salino.

3.5.3 Número de hojas

Para determinar esta variable, se contó el número total de hojas presentes antes y después el estrés salino.

3.5.4 Grado de tolerancia

El grado de tolerancia se evaluó a los 33 dds aplicando una puntuación de acuerdo al sistema de evaluación estándar desarrollado por el IRRI y descrita ampliamente por Bado *et al.* (2016). (tabla 4).

Tabla 4. Criterios de evaluación y selección de los materiales tolerantes de la investigación en estado de plántula

Calificación	Observación visual	Grado de tolerancia
1	Crecimiento normal, hojas sin síntomas de toxicidad.	Altamente tolerante
3	Crecimiento casi normal, pero blanqueamiento ocasional en las puntas de las hojas, algunas enrolladas.	Tolerante
5	Crecimiento severamente retardado, hojas más enrolladas, poco elongamiento de las hojas	Moderadamente tolerante
7	Completa suspensión del crecimiento, mayor cantidad de hojas secas, algunas plántulas muertas.	Sensible
9	Mayor cantidad de plántulas muertas o en procesos de muerte.	Altamente sensible

Nota:(Bado *et al.* 2016)

3.6 Análisis de datos

Para determinar el efecto de la salinidad sobre las variables (altura de la planta, longitud de la raíz y número de hojas) se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) mediante el software estadístico InfoStat, versión 2018 y para la separación de medias se realizó la prueba de Di Rienzo, Gúzman y Casanoves (DGC), se analizaron bajo el siguiente modelo estadístico:

$$Y_{ij} = \mu + t_i + f_j + (txf)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

$$\text{con: } i = 1, \dots, 4; j = 1, 2; k = 1, 2, 3$$

Donde:

Y_{ij} = Valor de la i-ésima observación ubicada en el i-ésimo tratamiento.

μ = Corresponde a la media general

t_i = Efecto del i-ésimo tratamiento ($i = 1, \dots, 6, t$)

f_j = Efecto del j-ésimo nivel de la fecha ($j = 1, 2$)

$(txf)_{ij}$ = Efectos adicionales (interacciones) para la combinación de los niveles de los factores.

ε_{ijk} = Variación de las observaciones debido al efecto aleatorio del error experimental.

Se corroboraron los supuestos de los modelos con sus respectivas pruebas diagnósticas y en los casos que hubo diferencias entre tratamientos (al 5,0% de probabilidad de error), se realizó la separación de medias. Los datos obtenidos del ensayo se analizaron mediante el software estadístico InfoStat. Con respecto a la variable medida en escala (grado de tolerancia) el análisis descriptivo se realizó en el programa R y RStudio.

Selección de las plantas que continúan en la fase dos

Los criterios que se consideraron para la selección de las plantas en estadio temprano fue el grado de tolerancia que haya manifestado el material durante el estado de plántula de acuerdo con la escala descrita por Bado *et al.* (2016) y las variables cuantitativas. Por cada material evaluado se logró seleccionar 15 plantas para continuar con la fase dos.

3.7 Fase II: Clasificación de líneas mutantes de arroz al estrés salino en fase reproductiva

3.7.1 Siembra

La siembra consistió en colocar cinco plantas de cada unidad experimental y de todos los tratamientos en bandejas de estereofón con dimensiones de 73,0 cm x 42,5 cm, todas las plantas se mantuvieron bajo esta condición durante las fases de macollamiento, floración y cosecha.

3.7.2 Manejo

El manejo consistió en realizar el cambio de la solución nutritiva cada dos días durante los 12 días que duro el estrés salino, a la solución nutritiva se le monitorio el pH cada dos días manteniéndose entre 5,0 y 6,0 utilizando ácido clorhídrico (HCl (1N)) con la ayuda de un pHmetro marca Extech, Modelo EC500.

La cosecha de las plantas se realizó a los 161 días, de forma manual, se cosecharon todas las panículas de cada planta de manera individual.

Se realizaron 3 aplicaciones del insecticida organosfosforado (diazinon) a dosis de $0,5 \text{ L} \cdot \text{ha}^{-1}$, no se realizó ninguna fertilización adicional a la de la solución nutritiva.

3.7.3 Diseño experimental

Se utilizó un diseño completo al azar (DCA), para minimizar el efecto de la variabilidad, según Contreras y López (2009).

Esta fase estuvo constituida de 18 unidades experimentales con cinco plántulas de cada línea seleccionadas de la fase anterior, siendo la capacidad máxima de las cajas para albergar plantas adultas, para un total de 90 plantas.

La asignación de bandejas se realizó al azar, en la figura 1 se muestra la distribución aleatoria de los tratamientos en las bandejas.

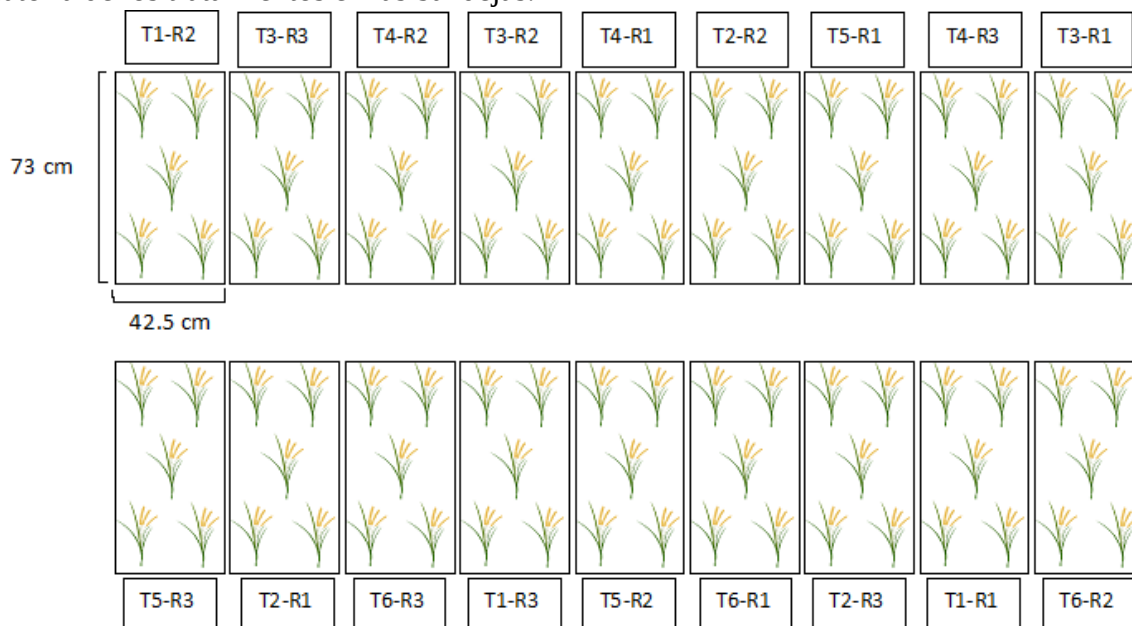


Figura 1. Estructura del área experimental disposición de las cajas con las plantas de arroz de cada tratamiento (T) y repetición (R).

3.7.4 Periodo de estrés salino

Este periodo consistió en someter todos los tratamientos a estrés salino en la fase de prefloración, modificando la CE a $10 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ con una cantidad conocida de sal común ($4,78 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$). Este periodo de estrés tuvo una duración de 12 días y se estableció cuando las plantas alcanzaron un 50% de floración (prefloración).

3.8 Variables evaluadas en la selección de genotipos promisorios

3.8.1 Altura de la planta

Esta variable de crecimiento se determinó midiendo con una cinta métrica la longitud de la planta en cm, desde la base del tallo hasta la punta de la hoja o panícula más alta. Las mediciones se realizaron antes y después de someterlas a estrés salino (Chavarría, 2011).

3.8.2 Vigor vegetativo

Esta variable se evaluó durante la etapa de máximo macollamiento, se contempló las plantas con mayor número de macollas, como las de mayor vigor vegetativo.

3.8.3 Biomasa total producida

La cosecha de las plantas de arroz se llevó a cabo en el estado de madurez fisiológica del grano, se cortaron las plantas de forma manual desde la base del tallo.

Se separaron las plantas cosechadas en dos muestras, el follaje y las panículas, al follaje se le determinó la biomasa, para esto se determinó el peso fresco, posteriormente se secó en un horno marca Precisión con circulación forzada de aire a 60°C por 72 horas (Contreras, Viña, Sakadevan y Muraoka, 2015), hasta peso constante (Castro, 2006).

A las panículas no se les determinó la biomasa ya que esta es destructiva, las mismas se desgranaron, se pesaron los granos y posteriormente se determinó producción promedio.

3.8.4 Número de panículas por planta

Esta variable se determinó al momento de la cosecha, se contó el número de panículas en cada una de las plantas.

3.8.5 Longitud de la panícula

Para esta variable se midió a la cosecha y en centímetros (cm) con una regla, tres panículas de cada planta, a continuación, se calcularon un promedio que representó la longitud total de las panículas de la planta. Esta medición se realizó desde la base de la panícula hasta el ápice de esta (IRRI, 2002).

3.8.6 Porcentaje de esterilidad

La esterilidad se determinó a la cosecha y se obtuvo utilizando las mismas panículas a las que se les midió la longitud, se contó manualmente la cantidad de granos llenos, vanos y totales por panícula y se calculó el porcentaje de esterilidad como lo describe IRRI (2002), esta labor se realizó una vez efectuada la cosecha y se usó la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Esterilidad} = \frac{\text{Número de granos vanos}}{\text{Número total de granos}} \times 100$$

3.8.7 Peso de 100 granos

Se determinó pesando 100 granos llenos de cada repetición por tratamiento, se utilizó una balanza analítica marca ADAM, modelo NIMBUS, todas las muestras contenían un porcentaje de humedad de 13,0% (IRRI, 2002).

3.8.8 Producción

Esta variable se determinó cosechando los granos de cada una de las plantas de cada tratamiento, luego se tomó el peso total por línea para conocer la producción promedio por material evaluado, todas las muestras contenían un porcentaje de humedad de 13%.

3.9 Análisis de datos

Todas las variables se analizaron mediante un análisis de varianza (ANDEVA), utilizando el software estadístico InfoStat, versión 2018, con el componente modelos lineales generalizados mixtos y para separación de medias, se realizó la prueba de Di Rienzo, Gúzman y Casans (DGC), utilizando el siguiente modelo:

$$Y_{ij} = \mu + t_i + \varepsilon_{ij}$$

con: $i = 1, \dots, 4; j: 1, \dots, 3$.

Donde:

Y_{ij} = Valor de la i-ésima observación ubicada en el i-ésimo tratamiento.

μ = Corresponde a la media general

t_i = Efecto del i-ésimo tratamiento

ε_{ij} = Variación de las observaciones debido al efecto aleatorio del error experimental.

En el caso de no cumplirse los supuestos, se modelaron los errores bajo distintas funciones de varianza y se escogió el modelo con mejor ajuste tomando en cuenta los criterios de Akaike y de información Bayesiano (AIC) y (BIC). Para evaluar las diferencias entre las medias se realizó la prueba de DGC ($p \leq 0,05$).

3.10 Clasificación de líneas mutantes

La clasificación de las líneas mutantes se realizó de acuerdo con las variables de respuesta que se evaluaron, se comparó el comportamiento entre las líneas y las variables evaluadas clasificándolas de acuerdo con un orden de tolerancia.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Fase I: Determinación del grado de tolerancia a la salinidad en estado de plántula.

La selección inicial de los mutantes de arroz comenzó con 72 plantas de cada uno de los cinco materiales evaluados, de las cuales en las líneas 400-13, 400-29, 400-15 solamente 15 plantas de cada una resistieron el primer periodo de estrés salino. Con respecto a las líneas mutantes 400-04 y 400-14, mostraron deterioro en la primera semana de estrés, tanto a nivel radicular como foliar causando pérdida total de las plantas en ambos tratamientos antes de terminar el primer estrés salino. Según Munns & Tester (2008), la respuesta de la planta ante la afectación por la salinidad comienza cuando la sal se acumula en concentraciones tóxicas en las hojas y estas mueren. Si la velocidad en la mortalidad es mayor que el ritmo de producción de tejido nuevo, la capacidad fotosintética de la planta no será capaz de suministrar hidratos de carbono suficientes para mantener el crecimiento de la planta.

4.1.1 Altura de la planta

No se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p \geq 0,05$) en los tratamientos, en esta variable de crecimiento evaluada antes del estrés salino y después de haber sometido los materiales a dicho estrés. Se puede observar que los materiales evaluados antes del estrés presentaron una altura similar de acuerdo con las medias, manteniendo la homogeneidad en la segunda medición, posterior al estrés salino (Figura 2).

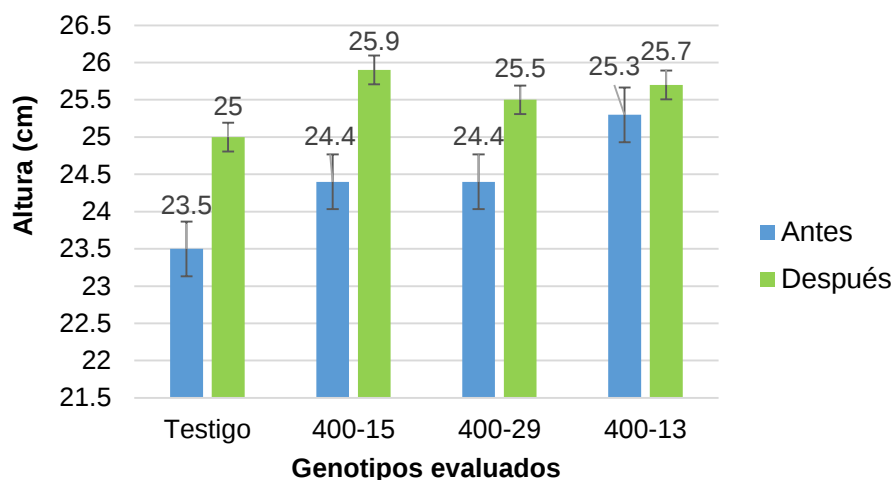


Figura 2. Altura promedio de tres genotipos tolerantes a la salinidad y un testigo de arroz, antes y después de ser sometidos a estrés salino. Las barras de error representan el error estándar.

Al comparar el crecimiento que tuvieron las plantas al finalizar los 12 días de estrés salino, no se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$), como se aprecia en la figura 2, sin embargo, todos los genotipos presentaron un crecimiento superior después del estrés salino, hubo un incremento significativo en la altura de las plantas en cada uno de los materiales evaluados.

Cuando se compara el promedio de las medias de todos los genotipos antes y después del estrés salino (Figura 3), se observa en esta variable que se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$).

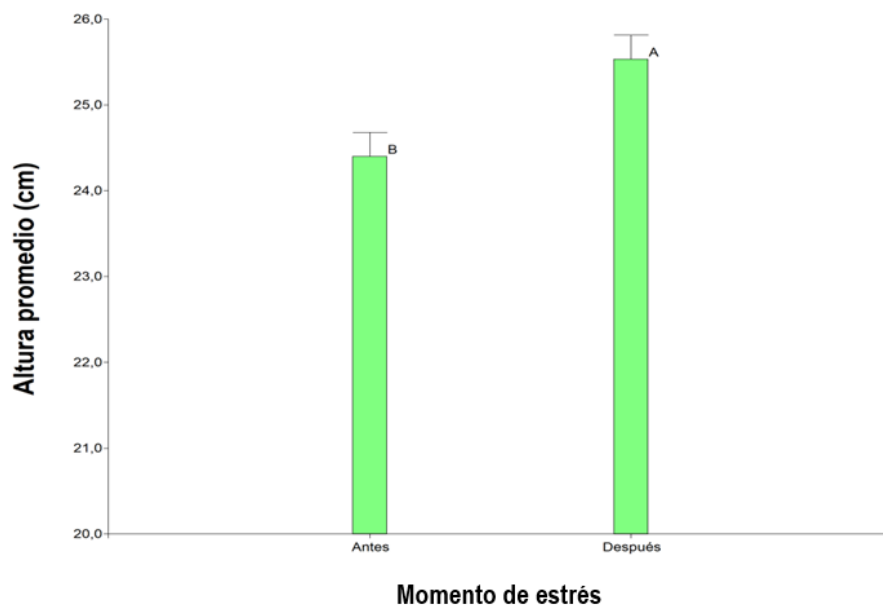


Figura 3. Altura promedio de los materiales evaluados antes y después del estrés salino. Letras distintas indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$). Las barras de error representan el error estándar.

Los resultados obtenidos en la altura de las líneas mutantes y del testigo, coinciden con los datos reportados por (Argentel, González, López, Fonseca y Girón, 2008), en el cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.), en donde no se registra que la altura se haya afectado, resultando uno de los componentes menos dañados por el estrés salino. Mientras que Munns & Tester (2008) observaron afectación en la altura de las plantas en investigaciones en el cultivo de trigo, encontrando que las variedades estudiadas eran moderadamente tolerantes a la salinidad. Cabe destacar que la tolerancia que presente un material en estado de plántula es independiente de la fase de floración. Sin embargo, Baby y Jini (2010)., Ghosh, Ali & Saikat (2016)., Mass & Hoffman (1997)., Shannon (1998) y Kathun & Flowers (1995) indican que el arroz es una planta susceptible a la salinidad, especialmente en las etapas vegetativas tempranas y reproductivas.

Según Grattan, Zeng, Shannon & Roberts, (2002) y Jamil *et al.* (2012) en un campo inundado y controlado con riego salino, observaron que las plántulas de arroz eran visiblemente más pequeñas. Esto coincide con lo reportado por Gonzales y García (1997) y Shereen, Mumtaz, Raza, Khan & Solangi, (2005) cuando expusieron plántulas de arroz a la salinidad durante dos semanas en un sistema hidropónico y bajo este estrés de salinidad el crecimiento de las plantas se redujo debido a los efectos osmóticos, disminuyó la capacidad de plantas para absorber agua. Por

otra parte, Ando *et al.* (2018) evaluaron diferentes genotipos de arroz sometidos a una CE entre 2 y 12 dS·m⁻¹, indicando que conforme se aumentó la conductividad eléctrica hubo mayor afectación en el crecimiento de las plantas, atribuyendo que a niveles más altos los dos componentes de la salinidad (estrés osmótico y toxicidad iónica) que se eclipsan por las condiciones de estrés severo, debido a la limitada absorción de agua (Castillo, Tuong, Ismail & Inubushi, 2007) y (Wopereis, Bouman, Tuong, Berge & Kropff, 1996).

Según Safitri, Purwoko, Dewi & Ardie (2017), la reducción del crecimiento en plantas es un buen indicador de la sensibilidad de los genotipos de arroz al estrés salino. Los 15 genotipos probados por Ali, Ghosh, Gantait & Chakraborty (2017) redujeron la altura y la menor reducción la presentó uno de los tratamientos ya comprobado como tolerante. Ese ensayo coincide con lo reportado por Samant & Jawali (2016), donde evaluaron 30 materiales en etapa temprana, mostrando diferencias significativas en el retraso del crecimiento de las plántulas bajo la salinidad tanto los genotipos de arroz sensibles como los considerados tolerantes y moderadamente tolerante.

Por otra parte, Cristo *et al.* (2001), evaluaron genotipos de arroz, los cuales fueron comparados con un testigo tolerante, previamente seleccionado para salinidad, y se comprobó que en uno de los materiales evaluados no presentaron problemas en el crecimiento, al contrario tuvieron un crecimiento acelerado a medida que aumentaban las concentraciones salinas, indicando que un material tolerante es aquel que presenta esta misma característica que el testigo tolerante, este comportamiento está asociado a un efecto de dilución de sales en los tejidos como una de las causas de su tolerancia.

De acuerdo a Rodríguez, Ledesma, Sevillano & Medina (2019), las plántulas de arroz que crecen en un ambiente salino sin verse afectada la altura de la planta presentan tolerancia al estrés por salinidad y se le puede atribuir a que las acuaporinas, proteínas canales de membrana, juegan un papel clave en el control del movimiento del agua, así como las proteínas del tonoplasto controlando el agua transcelular, reestableciendo y manteniendo la homeostasis osmótica celular ocasionado por las sales. En la presente investigación los genotipos estudiados, inclusive el testigo, según esta variable de altura de la planta, puede ser considerados genotipos que presentan algún grado de tolerancia al estrés salino en etapas tempranas.

4.1.2 Longitud de la raíz

No se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p \geq 0,05$) entre las líneas mutantes ni el testigo en esta variable de crecimiento. En la Figura 4, se pueden apreciar los valores de la longitud de la raíz promedio en cada uno de los materiales mostrando medias similares para ambos periodos (antes y después del estrés salino).

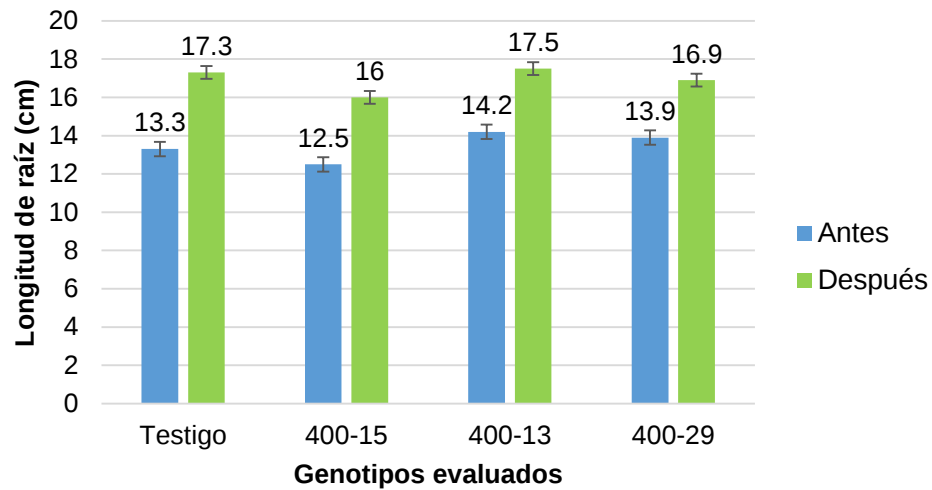


Figura 4. Longitud promedio de raíz de tres genotipos tolerantes a la salinidad y un testigo de arroz, antes y después de ser sometidos a estrés salino. Las barras de error representan el error estándar.

Cuando se compara el promedio de las medias de todos los genotipos y del testigo antes y después del estrés salino en esta variable (Figura 5), se encuentra que hay diferencia estadística ($p \leq 0,05$).

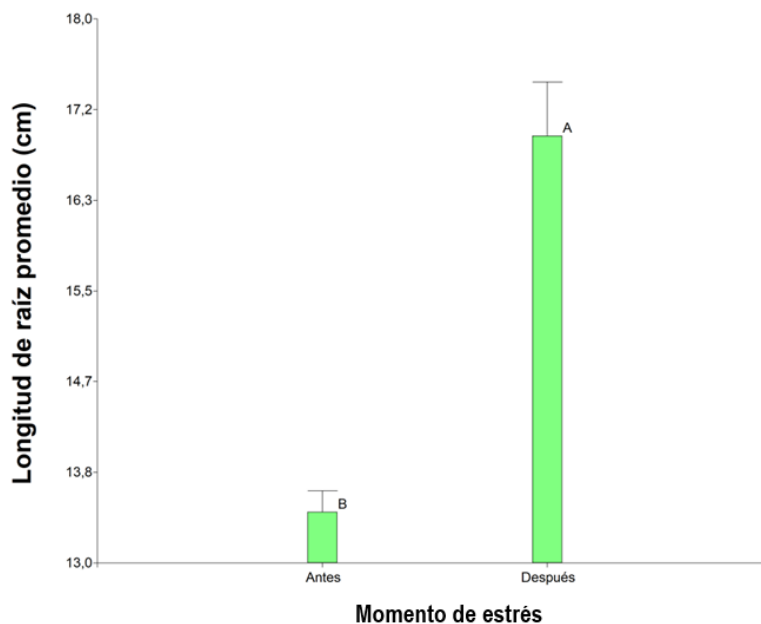


Figura 5. Longitud promedio de la raíz de los materiales evaluados antes y después del estrés salino. Letras distintas indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$). Las barras de error representan el error estándar.

Morales, Rodríguez, Sánchez, María y Torrecillas (2004) y Zambrano (2021), reportan que plantas de arroz sometidas a estrés salino presentaron menor crecimiento radical. Además, Morales *et al.* (2000), evaluaron 25 líneas de arroz expuestas a una conductividad de $12 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, donde se utilizó como testigo la variedad Pokkali, considerada como tolerante a la salinidad, presentando crecimientos radicales sin sal promedio de 8,23 cm y en condiciones salinas de 8,02 cm, estos mismos autores reportan que todas las líneas evaluadas presentaron menor crecimiento radical con respecto al control. Comparando estos resultados con la presente investigación, la longitud de raíz de todos los genotipos estudiados mostro un crecimiento aun durante el estrés salino, con un crecimiento promedio antes del estrés salino de 13,5 cm a 16,8 cm después del estrés salino.

Además, Gonzáles y García (1997), encontraron que plantas de arroz expuestas a condiciones salinas mostraron una disminución del crecimiento del sistema radical en materiales susceptibles, contrario a la variedad tolerante que presentó estimulación del crecimiento radicular durante el periodo de estrés salino, dicho resultado coincide los resultados obtenidos en este ensayo. Rodríguez (2019), señala que las plantas expuestas al estrés salino pueden responder con

un amplio rango de respuestas fisiológicas, en la morfología de la planta puede haber un incremento en el crecimiento de las raíces.

Por otra parte Piedra & González (2015), en un ensayo de estrés salino que realizaron con genotipos de arroz, encontraron que la longitud de la raíz presento menor crecimiento, atribuido principalmente a la pérdida de turgencia celular, comparado este comportamiento con un sistema radical alargado en condiciones de estrés osmótico, planteando que puede ser provocado por la concentración de sales en el medio de crecimiento como por la falta de agua, un crecimiento mayor a nivel radicular permite la búsqueda de agua y nutrientes, generando un mejor desarrollo.

Según Safitri *et al.* (2017), en un ensayo realizado con 15 materiales expuestos a salinidad, encontraron una longitud media de las raíces de todos los genotipos reducida. La reducción de la longitud de la raíz entre los genotipos tolerantes y sensibles fue homogénea. En la investigación realizada por Jamil *et al.* (2012), la longitud de la raíz en estado de plántula fue una de las variables más afectadas por la salinidad, siendo una variable para poder descartar materiales tolerantes.

Hernández, Álvarez, Martínez, Estrada y Cárdenas (2017), expusieron distintas especies forrajeras a diferentes niveles de conductividad eléctrica, los materiales probados redujeron el crecimiento radical al incrementar las concentraciones de NaCl, a partir de los $4,8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ se presentaron problemas en el crecimiento. Así mismo, Pirola (2018), estudió que en *Arabidopsis thaliana* la salinidad disminuye la longitud de la raíz, destacando como uno de los parámetros más afectados.

Se ha reportado que numerosas especies vegetales, incluyendo el trigo, presentan altos índices de longitud de raíz (superior al 90,0%), funcionando como un buen indicador para la evaluación de la tolerancia a la salinidad, ya que pueden realizar una exploración del medio donde se desarrollan más eficiente (Martínez *et al.* 2016). Sam (2007), confirma que este órgano juega un papel crítico en las propiedades hidráulicas relacionadas con la tolerancia a la salinidad y al déficit hídrico.

Esta variable también permite considerar que los genotipos evaluados en esta investigación y en esta etapa de desarrollo presenten alguna tolerancia a la salinidad, ya que todos, inclusive el testigo, presentaron desarrollo de las raíces aun en presencia del estrés salino.

4.1.3 Número de hojas

En la evaluación de esta variable no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p \geq 0,05$) entre los materiales evaluados como se aprecia en la Figura 6, antes de someter las plantas a estrés salino, la media se mantuvo en 4 hojas para las líneas mutantes y el testigo, después del periodo de estrés, el testigo mantuvo el promedio de hojas y todos los genotipos evaluados aumentaron el promedio a 5 hojas, no siendo estadísticamente significativo.

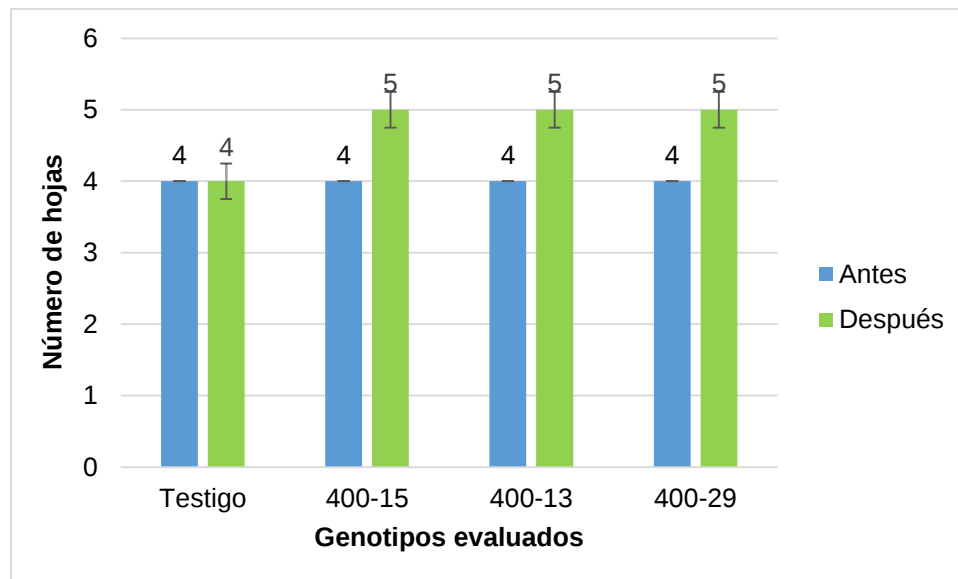


Figura 6. Número de hojas promedio de tres genotipos tolerantes a la salinidad y un testigo de arroz, antes y después de ser sometidos a estrés salino. Las barras de error representan el error estándar.

Cuando se compara el promedio de las medias de todos los genotipos y el testigo antes (poner porcentaje) y después del estrés salino (poner porcentaje) en esta variable (Figura 7), se encuentra que hay diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$).

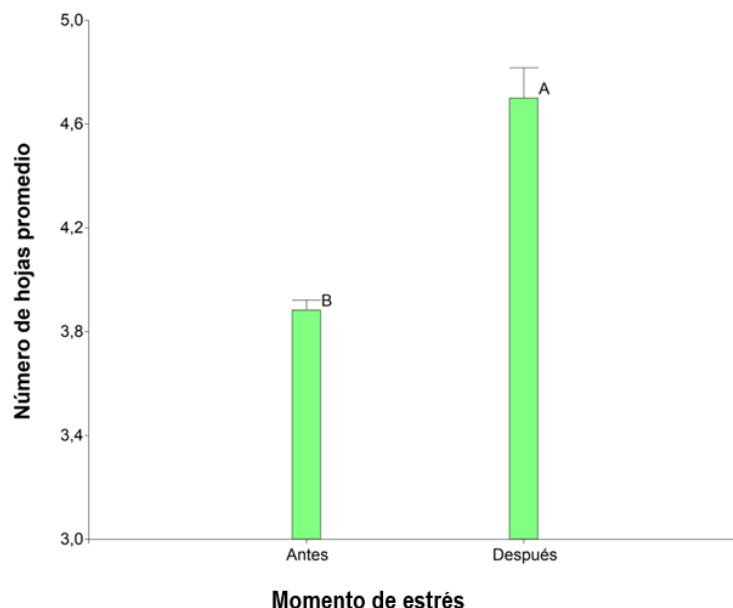


Figura 7. Número de hojas promedio de los materiales evaluados antes y después del estrés salino. Letras distintas indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$). Las barras de error representan el error estándar.

Los resultados coinciden con los obtenidos por DellAmico *et al.* (2008), donde no observaron efectos negativos en las plántulas, siendo estas capaces de sobrevivir y seguir creciendo. García, García y Quito (2019), afirma un aumento significativo a través del tiempo en el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd).

Por otro lado, Beltrano, Ruscitti, Arango & Ronco (2013) y Grimaldo *et al.* (2017), mencionan disminución del número de hojas en el cultivo de chile expuesto a niveles salinos. Además, en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) se presenta este mismo problema (Cortes y Real, 2007 y Espinoza, Gutiérrez, Amador, Morales y Montiel, 2014). En el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) y sábila (*Aloe vera* L.), García y Medina (2010) y Nasser (2017), señalan como efecto del estrés salino una disminución en el número de hojas de los cultivos mencionados, debido a los cambios morfológicos, bioquímicos y fisiológicos que ocurren en las plantas al ser expuestas al estrés salino. Esto también coincide con lo reportado por Pirola (2018), en plantas de *A. thaliana*.

4.1.4 Grado de tolerancia

Como se observa en la figura 8, el nivel de tolerancia de los materiales evaluados según escala de salinidad donde, ninguno de los materiales es considerado altamente tolerante en estado de plántula. Se presentaron plantas con crecimiento casi normal, se observó un blanqueamiento ocasional en las puntas de las hojas y algunas enrolladas, considerándolo como materiales tolerantes según la escala de salinidad. Dicha característica fue observada con mayor frecuencia en las líneas 400-29 y 400-13, con un 13,33%. Dentro de los materiales moderadamente tolerantes la frecuencia es mayor en las líneas 400-29 con un 33,33% seguido por la línea 400-13 y 400-15 con un 26,67%, y por último el testigo con un 20,0%, son plantas con crecimiento casi normal, con blanqueamiento ocasional en las puntas de las hojas y algunas enrolladas. Las líneas que mostraron mayor número de plantas con completa suspensión del crecimiento, presentando mayor cantidad de hojas secas y algunas plántulas muertas, fueron la línea 400-15 con un 66,67% y el testigo con un 73,33%.

Según lo evaluado, la línea mutante 400-29 mostró en su mayoría plantas moderadamente tolerantes y sensibles, en donde un 13,33% del material expresa características tolerantes en estado de plántula. La mayor sensibilidad a la salinidad la presentan los materiales 400-15 y el testigo con un 60% y un 73,33% respectivamente.

En el momento del estrés se perdieron en su totalidad las líneas mutantes 400-04 y 400-14. Los síntomas de lesión por salinidad encontrados en esta investigación concuerdan con lo citado por Mondal & Borromeo (2016), quienes señalan que estos se comenzaron a manifestar a partir de los dos días desde el primer día de salinización y a los ocho días después, los síntomas fueron mucho más evidentes. Varios investigadores como Laynez, Méndez y Mays (2008) observaron blanqueamiento de puntas, hojas secas y muerte total de plántulas en sus ensayos. Las quemaduras en las hojas son producidas por las altas concentraciones de iones cloruro, que si bien es cierto es un elemento esencial para el crecimiento, causa toxicidad si la concentración es excesiva en el tejido vegetal, disminuyendo la fotosíntesis y causando inhibición en la absorción de nitratos (Villavicencio, Alonzo, Sotelo y Leal, 2011).

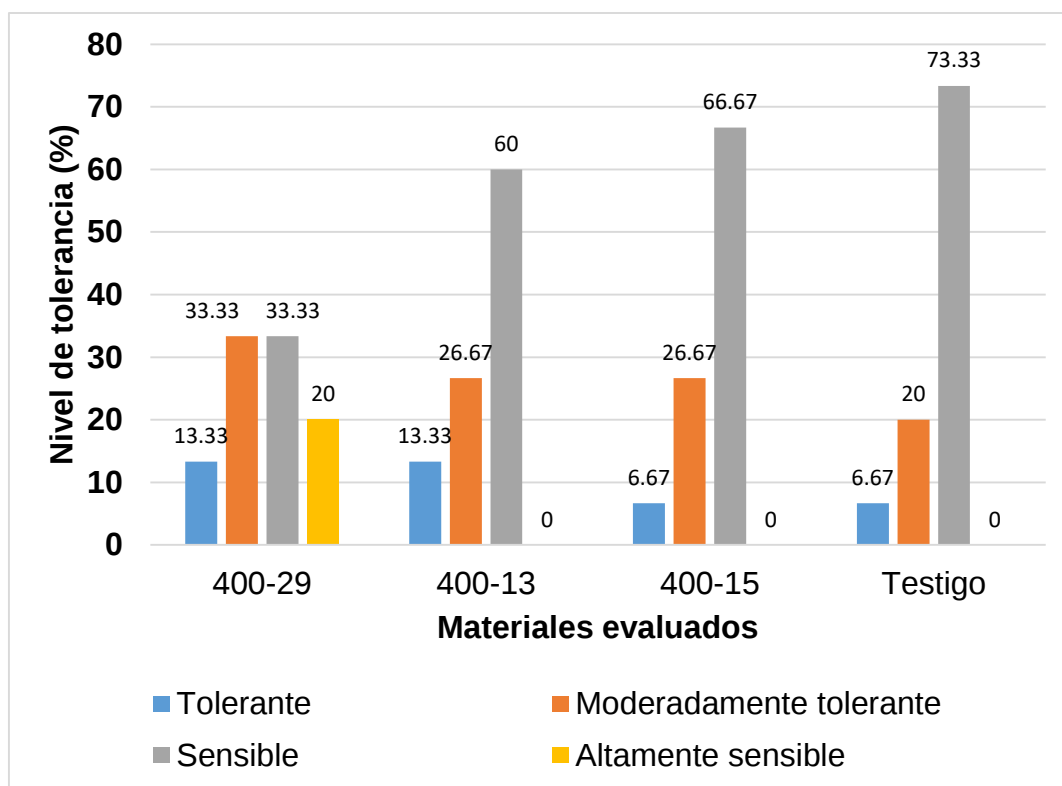


Figura 8. Nivel de tolerancia de los materiales, expresado en porcentaje. El gráfico compara el nivel de tolerancia a la salinidad de cada uno de los materiales evaluados, una vez finalizado el estrés salino.

4.2 Fase II: Clasificación de líneas mutantes de arroz al estrés salino en fase reproductiva

4.2.1 Altura de la planta

No se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p \geq 0,05$) en esta variable entre los materiales evaluados. Como se observa en la Figura 9, los materiales mostraron medias similares, tanto antes como después del estrés salino, por lo tanto, no hubo efecto significativo en el crecimiento aéreo de las plantas de arroz.

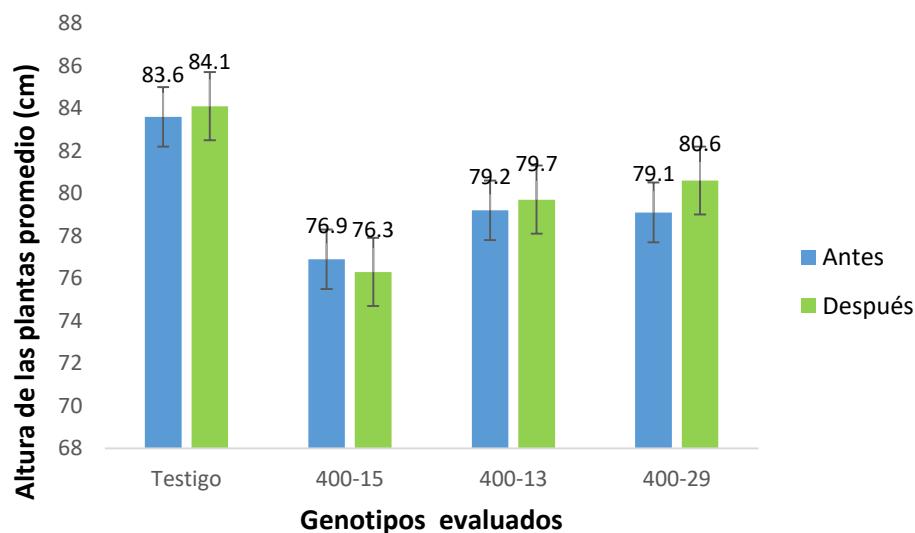


Figura 9. Crecimiento promedio de tres genotipos tolerantes a la salinidad y un testigo de arroz, antes y después de ser sometidos a estrés salino. Las barras de error representan el error estándar.

Estos resultados concuerdan con lo reportado por autores como Cristo, González, Cárdenas, Regla y Pérez (2004)., Argente *et al.* (2008) y Valdés, Cepero & León (2012) en suelos salinos, en donde la altura final de los materiales evaluados no se vio afectada, sin presentar susceptibilidad en este carácter. Morales, Bolarín y Cayuela, (2006) coinciden con lo mencionado en esta investigación en donde el crecimiento no disminuyó, pero con respecto al control, el tamaño fue inferior. Cristo, Gonzales, Ventura & Rodríguez (2018), evidenciaron diferencias en todos los cultivares estudiados a medida que se incrementaron las concentraciones salinas, considerando la altura de los materiales una variable aceptada para clasificar un cultivar como tolerante.

Kumar, Kumar, Kim, Ryu & Cho, (2013), mencionan que las plantas que presentan tolerancia a las sales distribuyen las concentraciones de sodio por sus tejidos y por las hojas. Los genotipos que no presentan cambios en su altura durante el periodo de estrés se pueden atribuir a lo citado anteriormente.

Por otra parte, diversos autores como Ando *et al.* (2018)., Espinoza *et al.* (2014). Grattan *et al.* (2002)., Gonzales y García (1997)., Jamil *et al.* (2012)., Shereen *et al.* (2005)., Samant & Jawali (2016) y Safitri *et al.* (2017) mencionan que se presenta una afectación en la altura del arroz conforme se aumenta el estrés salino. Por otra parte, la altura final del cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) se ve afectada significativamente López *et al.* (2018). Parés y Basso (2013), señalan afectaciones en el cultivo de papaya (*Carica papaya* L.) debido al desequilibrio nutricional que

causa la interferencia de los iones cloro y sodio en los nutrientes esenciales que requieren las plantas.

4.2.2 Vigor vegetativo

En cuanto al vigor híbrido, se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$) entre las líneas mutantes y el testigo. Como se muestra en la Figura 10, el testigo en promedio presentó mayor número de macollas, seguido por la línea 400-29 y con menor número de macollas la línea 400-15. Sin embargo, no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las líneas mutantes, manteniendo una media muy similar, variando entre dos y tres macollas entre éstas.

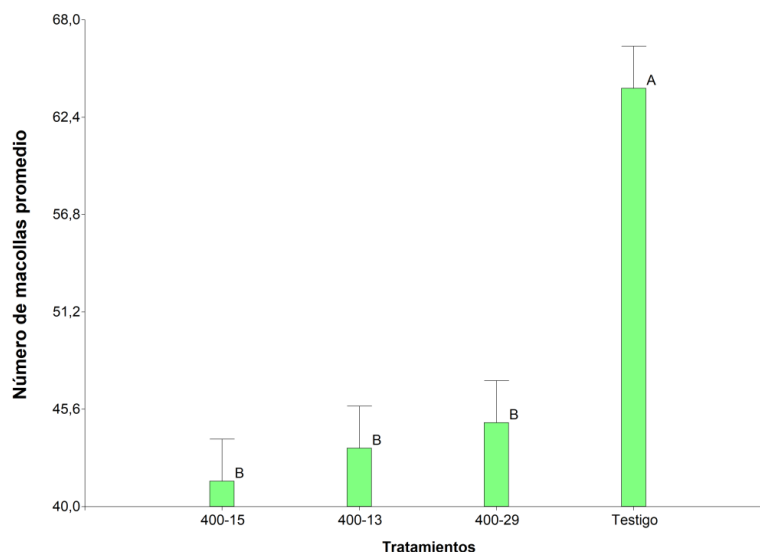


Figura 10. Número de macollas promedio de tres genotipos tolerantes a la salinidad y un testigo de arroz, antes y después de ser sometidos a estrés salino. Letras distintas indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$). Las barras de error representan el error estándar.

Cuando se compara el promedio de las medias de todos los genotipos antes y después del estrés salino en esta variable (Figura 11), se encuentra que hay diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$). Además, se observó un aumento del vigor vegetativo durante los 12 días que duró el estrés salino.

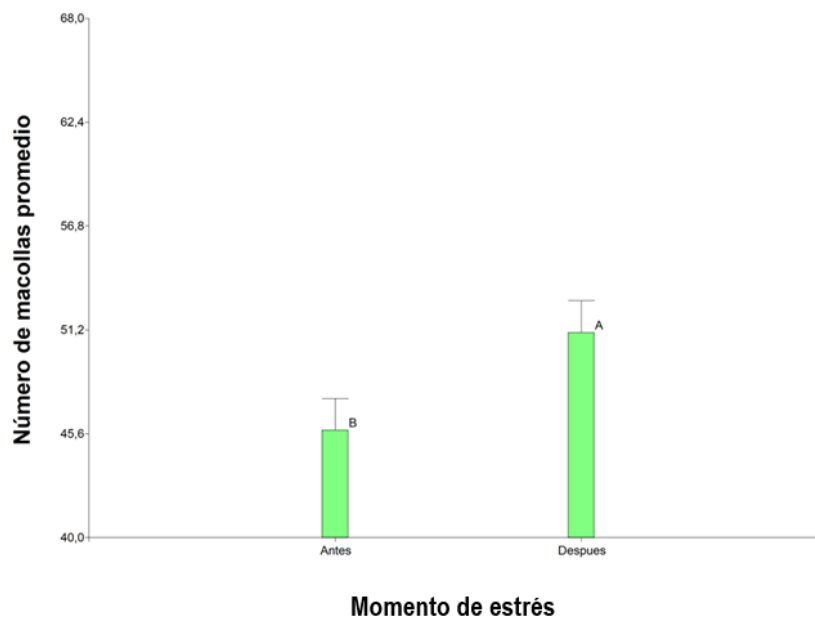


Figura 11. Número de macollas promedio de los materiales evaluados antes y después del estrés salino. Letras distintas indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$). Las barras de error representan el error estándar.

Los materiales evaluados en esta investigación no presentaron daños visibles por salinidad, ni se detuvo su crecimiento con respecto a la producción de macollas. Uno de los mecanismos de tolerancia que puede evitar los efectos tóxicos de la salinidad es el vigor vegetativo, las concentraciones de Na^+ transportado es menor en genotipos de crecimiento rápido (Reddy, Kim, Yoon, Kim & Kwon, 2017). Según Munns & Tester (2008), el principal efecto de la salinidad en los cereales es la reducción del número de macollas. Contrario a lo mencionado por Chaudhary *et al.* (2018), en donde mencionan que el arroz aumenta progresivamente la tolerancia a la salinidad durante la fase de macollamiento, sin embargo, se puede atribuir a la capacidad de macollamiento y de distribución del sodio en los tejidos.

4.2.3 Biomasa total producida

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los materiales evaluados, el promedio de biomasa total producida entre los materiales utilizados fue similar. Este comportamiento se puede observar en la Figura 12 para cada tratamiento.

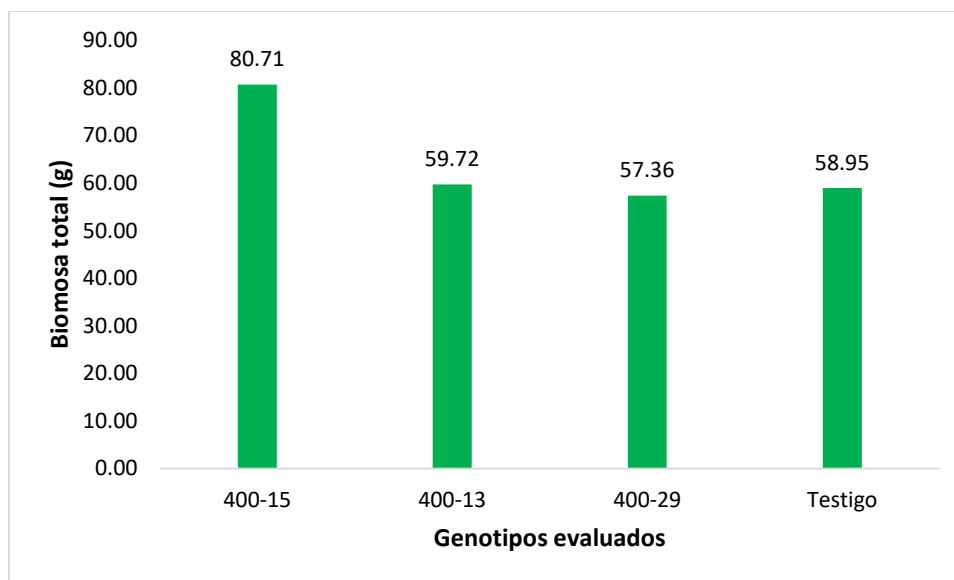


Figura 12. Biomasa total promedio de los materiales evaluados, expresado en gramos (g). El gráfico compara la biomasa promedio producida para cada uno de los materiales. Las barras de error representan el error estándar.

Mora, Pando, Borja y Moran (2020), en un estudio donde sometieron a estrés salino 30 materiales, en su mayoría presentaron reducción en materia seca en relación con el testigo, aunque muchas de las plantas evaluadas dentro de un rango aceptable, según lo señalado, la reducción del peso bajo estrés salino se debe a la desviación de energía del crecimiento y el metabolismo, además del aumento del costo de mantenimiento de las células en crecimiento bajo estrés. Autores como Ali *et al.* (2017), señalan altas reducciones de peso total no solamente en genotipos sensibles sino en genotipos moderados y tolerantes, evidenciando el daño que causa a la biomasa total el estrés por salinidad. Los hallazgos anteriores coinciden con lo reportado por Gain, Mannan, Pal, Hossain & Parvin (2004)., Lamz, Reyes y González (2013) y Zambrano (2021) quienes evidencian una disminución en la producción de materia seca conforme aumentó los niveles salinos en los materiales probados, este mismo comportamiento es observado en el cultivo de frijol (Quintana, Sandoval y Torres, 2016), en el cultivo de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) (González *et al.* 2020) y en el cultivo de papaya (Parés y Basso, 2013).

Como se aprecia en la Figura 12, los genotipos evaluados no presentaron diferencias estadísticamente significativas, sin embargo, según lo citado, se podría decir que los materiales 400-13, 400-29 y el testigo desviaron más energía del crecimiento para el mantenimiento de sus células bajo estrés, contrario a la línea 400-15, bajo este principio, destinó menos energía al

presentar mayor biomasa total, manejando de una mejor manera la distribución de la energía en los periodos de estrés salino.

La masa seca se ve gravemente afectada por la presencia de sales y entre otros componentes, el transporte de agua e iones, lo que promueve toxicidad iónica y desbalance nutricional (Villavicencio *et al.* 2011). Cuando la planta recibe una entrada excesiva de sodio, se da una restricción del calcio, elemento necesario para la estructura de los tallos (Saldaña, Bejarano y Guaqueta, 2017).

Los materiales que presenten valores más altos de masa seca pueden atribuirse, a un aumento en la producción de solutos orgánicos (azúcares, aminoácidos) contrarrestando los efectos osmóticos de la salinidad. Las plantas sometidas a salinidad hacen un ajuste osmótico y reducen su potencial, utilizando una parte de los fotosintatos. Además, la masa seca es uno de los criterios más apropiados para medir el crecimiento y la capacidad del sistema de asimilación de la planta, relacionando ampliamente la producción total de materia seca con el rendimiento del grano (Cristo *et al.* 2018).

4.2.4 Componentes de rendimiento

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$) en el número de panículas de los materiales evaluados con respecto al testigo, figura 13. Con un promedio de 117 panículas por planta en la línea 400-15, superior al testigo en 32 panículas, las líneas 400-13 y 400-29 presentaron un promedio de 106 y 110 panículas. Con respecto a la longitud de las panículas de los materiales evaluados, se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$), el testigo y las líneas mutantes 400-13 y 400-29 no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre sí, sin embargo, son significativamente diferentes con respecto a la línea 400-15, esta presenta menor longitud promedio de la panícula.

El número de espigas presentó diferencias significativas, como se observa en la figura 13. La línea que registró menor número de espigas es la 400-15, mostrando diferencias significativas al compararla con el testigo y con las líneas mutantes 400-13 y 400-29. Estos últimos materiales mencionados no presentan diferencias estadísticamente significativas entre sí.

No se observaron diferencias estadísticamente significativas entre las líneas 400-13, 400-29 y el testigo con respecto al número de granos. Se puede observar en la Figura 13, que estos materiales no tienen letras distintas, manteniendo una media estadísticamente similar. Pero si

presentan diferencias significativas con la línea 400-15, generando mayor número de granos con respecto a esta línea.

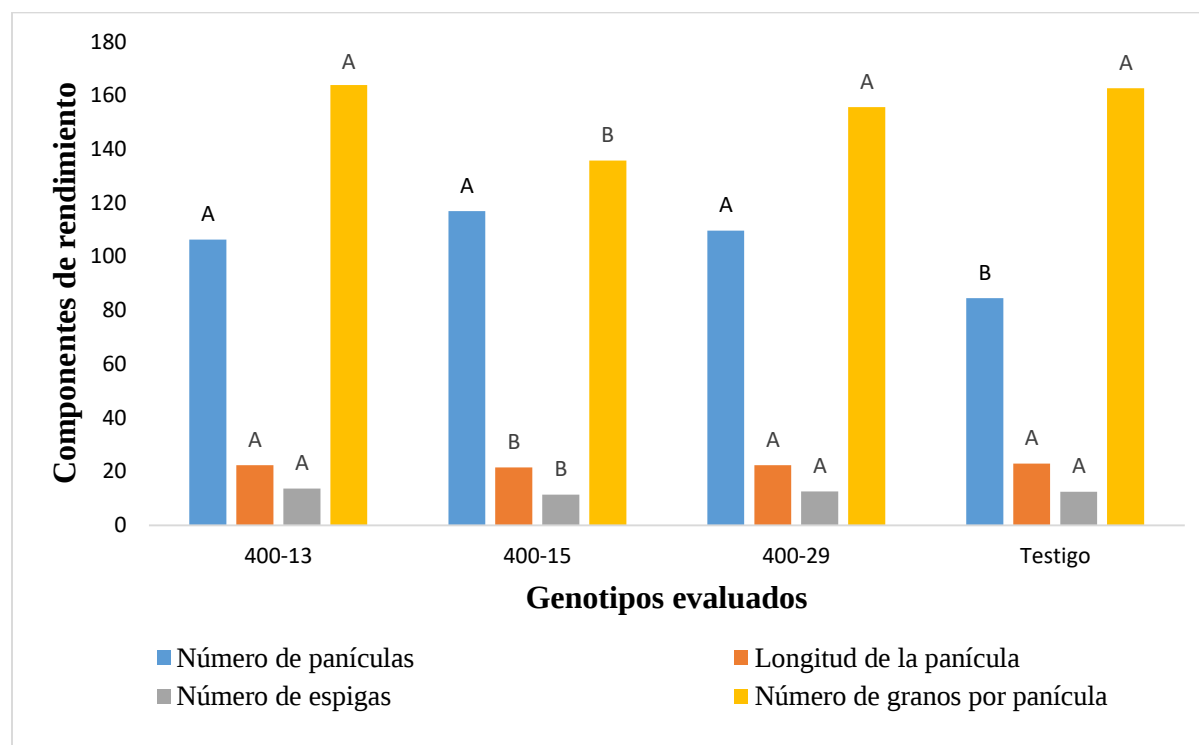


Figura 13. Componentes de rendimiento evaluados. El gráfico compara los componentes de rendimiento de los genotipos evaluados. Letras distintas indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$).

Las líneas mutantes evaluadas presentan longitud de panícula menores a las reportadas por Acosta (2020), la mejor longitud promedio fue de 24,0 cm y la mayor de 28,0 cm. Sin embargo, se acerca más a lo señalado por Aguilar (2015), alcanzando un promedio de longitud de 23,0 cm.

Con respecto al número de granos por panícula, los resultados obtenidos son superiores a Aguilar (2015), quien realizó un experimento en suelo salinos en Samborombón, alcanzando una media de 109 granos por panícula. Según (Terrazas, 2019) el componente que se ve mayormente afectado por la salinidad es el número de granos por panícula, repercutiendo negativamente en el rendimiento.

Según Catalá *et al.* (2019b), las plantas de arroz tienen la capacidad de compensación entre los componentes del rendimiento, demostrando en las plantas que han producido pocas panículas, el número de granos por panícula es mayor. Esta dinámica se observó en la línea 400-15, siendo una de las que presentaron mayor número de panículas, pero una menor longitud en la panícula y un menor número de espigas y granos en comparación con los otros materiales evaluados. Aun

así, Aguilar (2017), señala que esta capacidad de compensación entre los componentes de rendimiento, puede que no sea suficiente para corregir pérdidas de producción debido a la salinidad.

Zidor, Cajou, Viña, Contreras y Avilés (2016), realizaron un ensayo en donde la mayor cantidad de panículas se obtuvo $1,04 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, disminuyendo la producción de panículas a los $6 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, representando una disminución del 25,0%, en donde la variedad que mayormente se vio afectada disminuyó 2,79 panículas por cada gramo de salinidad que se aumente.

El comportamiento de las líneas 400-29 y 400-13 es estadísticamente igual al testigo en cuanto longitud de la panícula, número de espigas y granos, exceptuando que el testigo fue quien presentó menor número de panículas por planta, siendo una característica a favor de las líneas mutantes ya que se espera que a mayor número de panículas mayor producción.

4.2.5 Peso de 100 granos llenos

No se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$) en ninguno de los materiales evaluados, como se puede observar en la Figura 14 ($p = 0,1257$).

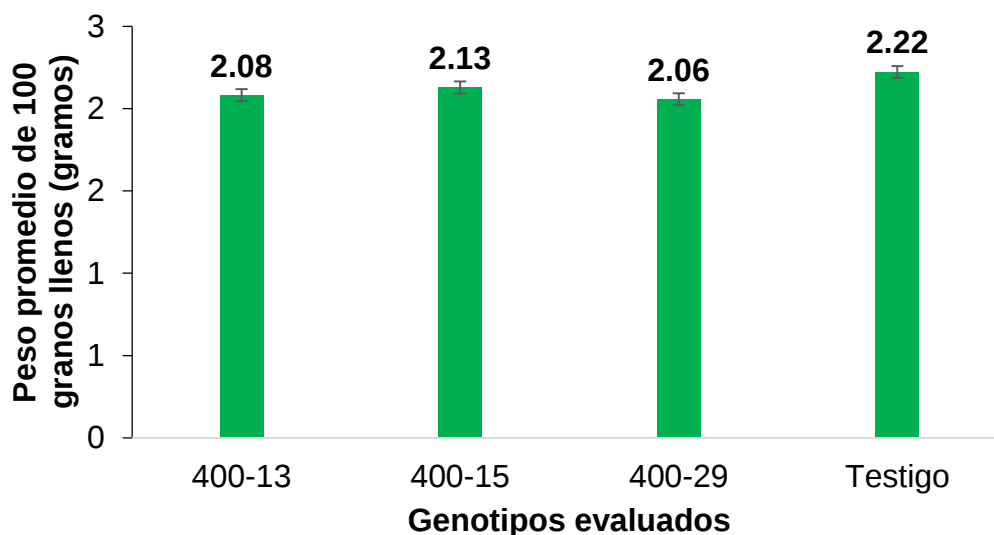


Figura 14. Peso promedio en gramos de 100 granos llenos de los materiales evaluados. El gráfico compara el peso promedio de 100 granos llenos de los materiales. Las barras de error representan el error estándar.

Acosta (2020) y Aguilar (2015) reportan medias de 2,8 y 2,7 gramos catalogándolo como pesos favorables. En el estudio realizado por Catalá *et al.* (2019b), una de las 6 variedades de arroz estudiadas es considerada con peso de granos bajo, con 2,14 gramos en 100 granos. Rodríguez (2019), indica que el desarrollo productivo de las plantas se ve afectado por el estrés salino. Este peso se encuentra por encima de las líneas mutantes evaluadas. En la presente investigación, si bien es cierto que el testigo mostró un mayor peso en 100 granos, en los genotipos evaluados no se presentaron diferencias significativas, indicando que esta variable no fue afectada por la salinidad presente en la solución.

4.2.6 Porcentaje de esterilidad

El porcentaje de esterilidad de los genotipos no evidenció diferencias significativas, según se aprecia en la Figura 15 ($p = 0,9303$).

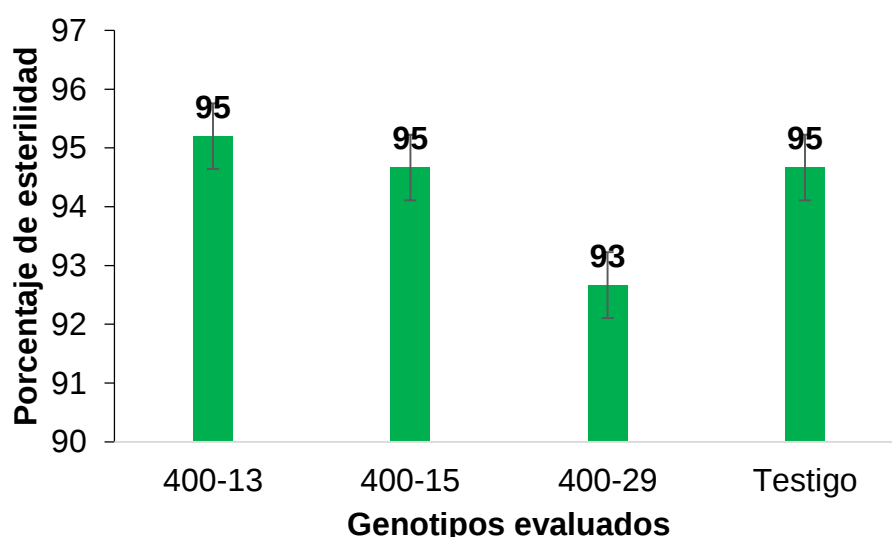


Figura 15. Porcentaje de esterilidad promedio de los materiales evaluados. Las barras de error representan el error estándar.

La esterilidad de la panícula es un efecto de la salinidad, ya que se ve afectada la polinización, disminuyendo la capacidad de carga del polen, la superficie del estigma y la fertilización, debido a mecanismos genéticos y deficiencias nutricionales (Hussain *et al.* 2017). Zambrano (2021), indica que arrozales con conductividades mayores a $1,5 \text{ dS m}^{-1}$, pueden llegar a visualizar daños por pérdidas aproximadas del 14,0%.

Las líneas mutantes y el testigo tuvieron porcentaje de esterilidad sumamente altos, diversos autores como Asch & Wopereis (2001)., Ghosh *et al.* (2016) y Kathun & Flowers (1995), mencionan que la salinidad acarrea una serie de problemas morfo agronómicos en las plantas de arroz que al final repercuten negativamente en el rendimiento debido a la alta esterilidad, tal como se aprecia en la Figura 15. Coincidiendo además con lo señalado por Catalá *et al.* (2019b), en donde se menciona como uno de los componentes más afectados por la salinidad.

Sin embargo, estos materiales al encontrarse en un periodo de evaluación, la semilla llena producida y en apariencia viable son valiosas para continuar con investigaciones en esta misma línea.

5.2.7 Producción promedio

La producción promedio por cada una de las líneas mutantes y el testigo no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre sí, como se detalla en la Figura 16 ($p = 0,4742$).

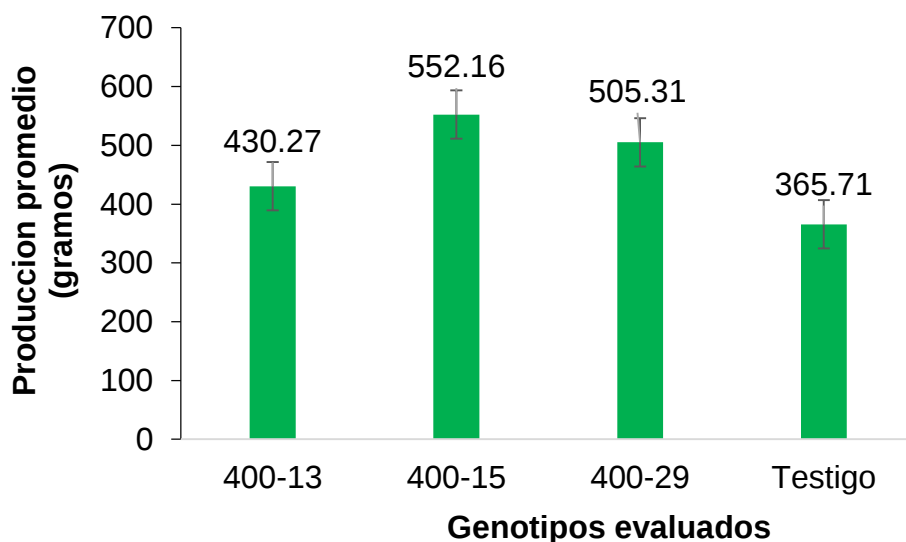


Figura 16. Producción promedio para cada uno de los materiales evaluados. El gráfico compara el rendimiento total de los materiales. Las barras de error representan el error estándar.

Según Chaudhary *et al.* (2018), la tolerancia a la salinidad del arroz disminuye una vez iniciada la emergencia de la panícula hasta la floración, y esto se refleja en el bajo rendimiento de los materiales evaluados. Sin embargo, es necesario indicar que la mayoría de las poáceas disminuyen el rendimiento cuando son afectadas por salinidad (Mesa, 2003). La reducción del rendimiento de las plantas es el efecto más importante y tangible del estrés salino en la agricultura

(Parihar *et al.* 2015). En el cultivo de arroz, la falta de transformación de los carbohidratos en el desarrollo de espigas causa una disminución directa en el rendimiento de los granos, la reducción del contenido de azúcares solubles a las espiguillas superiores e inferiores y la inhibición de la actividad de la enzima almidón sintetasa durante el desarrollo del grano, son las principales razones que explican el menor rendimiento del grano de arroz bajo estrés salino (Hussain *et al.* 2017).

Aguilar, Ramírez, Blanes y Romero (2016), mencionan que el rendimiento en grano presenta un descenso a partir de una conductividad eléctrica de $3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, representando 1,9 gramos de sal por litro, disminuyendo un 12,0% por cada unidad de conductividad adicional. Además, Catalá *et al.* (2019a), un valor superior a los $4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ en el cultivo de arroz significa una pérdida potencial en cosecha de hasta un 32,0%. Zidor *et al.* (2016) encontraron que las tres variedades expuestas al estrés salino presentaron afectación en el rendimiento.

Hakim *et al.* (2014), analizaron el efecto de la salinidad en el rendimiento del arroz, y observaron que conforme aumentaron los diferentes niveles de salinidad, se presentó una disminución en rendimiento, registrando un rendimiento mínimo con $12 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

Por otra parte (Álvarez *et al.* 2008), realizaron experimentos en Cuba en donde 52 especies de plantas entre cereales, pastos, vegetales y tubérculos fueron expuestas a diferentes niveles de estrés salino y bajo estas condiciones se reportaron reducciones de los rendimientos a partir de los $2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y pocas plantas tolerantes a salinidad, lograron producciones por debajo de los $5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. En el cultivo de tomate se registraron pérdidas significativas en el rendimiento, cuando se exponen a condiciones salinas (Cortés y Real, 2007). El cultivo de camote (*Ipomoea batatas* L.) expuesto al estrés salino presenta una marcada afectación en la producción, conforme aumenta la salinidad Rodríguez-Delfín, Posadas y Quiroz (2014). En el cultivo de frijol se reportó una disminución significativa del rendimiento en condiciones salinas (López *et al.* 2018).

Es evidente el nivel de daño que causa la salinidad en distintas variedades de plantas, disminuyendo sustancialmente el rendimiento de los cultivos que se exponen a este factor abiótico, en el cultivo de arroz, la afectación a nivel de rendimiento es evidente con un valor umbral de CE de $1,9 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, con pérdidas registradas del 10,0% a partir de los $3,0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, 25 % menos a los $4,6 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, 50 % a los $7,4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y un 100% a los $12,0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Sigüenza, Ocola y Guerrero, 2019).

En esta investigación estadísticamente no existen diferencias estadísticamente significativas en la producción promedio con respecto al testigo, sin embargo, al analizar los datos

(Figura 16) las líneas mutantes presentan mayor rendimiento, que podrían ser significativos si se realizan estudios en áreas extensas de cultivo o mediante manejo comercial en el cultivo de arroz.

5. CONCLUSIONES

- Las líneas mutantes presentaron diferente grado de tolerancia a la salinidad dependiendo del estado fenológico evaluado.
- La metodología de evaluación utilizada en la primera fase fue efectiva para seleccionar plantas individuales que presentaban tolerancia a la salinidad en fase temprana.
- No se logró determinar el grado de respuesta al estrés salino en la etapa reproductiva que permitiera la clasificación de las mejores líneas mutantes, por el grado de heterogeneidad que mostraron los genotipos.
- La metodología empleada en esta investigación permitió determinar que las líneas mutantes estudiadas no presentaban un alto grado de homocigosis, ya que presentaron respuestas diferenciadas a las variables estudiadas.
- Se observó que las tres líneas mutantes que lograron concluir esta investigación presentaron una tendencia a evidenciar valores mayores de producción promedio que el testigo, pudiendo ser significativo al incrementarse las áreas de siembra.

6. RECOMENDACIONES

- Evaluar mayor número de plantas mutantes, indiferentemente de la etapa de evaluación, esto con el fin de aumentar la probabilidad de seleccionar un mutante tolerante.
- Con el fin de mejorar los procesos de evaluación de mutantes candidatos, se sugiere el uso de materiales susceptibles o tolerantes que sirvan como indicadores al estrés salino.
- Esta investigación indica que en futuros procesos de selección se podría seleccionar mutantes tolerantes de acuerdo con la etapa de desarrollo del cultivo.
- Con el fin de evitar evaluar materiales con alta heterocigosis que presentan respuestas diferenciadas se sugiere al programa BIOVERFI realizar evaluaciones en poblaciones de mutantes candidatos más avanzadas (M_6).
- La semilla cosechada en esta investigación se sugiere que continúe en un proceso de incremento para posteriormente seguir con investigaciones en invernadero y campo relacionados con estrés salino.
- Es conveniente incorporar técnicas de marcadores moleculares y bioquímicas que permitan ejercer una selección asistida con estos métodos y así acelerar los procesos de mejora. El uso de indicadores bioquímicos permite una selección temprana de genotipos tolerantes acortando el tiempo para incorporar variedades a la producción arrocerá.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, L. A. (2020). Comportamiento de cinco variedades de arroz (*oryza sativa* l.) en suelos salinos, en el cantón de san jacinto de yaguachi, ecuador. [Tesis de grado]. Universidad de Guayaquil.
- Agüero, Y. M. (2018). *Hongos micorrizicos arbusculares como mitigadores del estrés salino: Respuesta fisiológica, bioquímica y crecimiento de variedades de albahaca* [Tesis de posgrado]. Centro de investigaciones biológicas del Noroeste. La Paz, Baja California Sur.
- Aguilar, I. (2015). Respuesta agronómica del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) a la aplicación de un corrector de suelos salinos y tres fuentes de fertilizantes nitrogenados [Tesis de grado]. Universidad de Guayaquil Facultad de Ciencias Agrarias, Ecuador.
- Aguilar, M. (2017). Rice sensitivity to saline irrigation in Southern Spain. *Agricultural Water Management* 188, 8-28.
- Aguilar, P. M., Ramirez, F. L., Blanes, A. M. y Romero, O. C. (2016). Respuesta agronómica del arroz al riego salino en distintas fases del cultivo. Consejería de Agricultura, Pesca, y Desarrollo Rural. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera. 1-25 p.
- Ahloowalia, B. S., Maluszynski, M. & Nichterlein, K. (2004). Global impact of mutation derived varieties. *Euphytica*, 135(2), 187–204.
- Ali, M.N., Ghosh, B., Gantait, S. & Chakraborty, S. (2017). Selection of rice genotypes for salinity tolerance through morpho-biochemical assessment. *Journal of Agricultural Science*. 21 (5), 288–298. <http://dx.doi.org/10.21082/ijas.v>
- Allbed, A. & Kumar, L. (2014). Soil Salinity Mapping and Monitoring in Arid and Semi-Arid Regions Using Remote Sensing Technology: A Review. *Advances in Remote Sensing*. 02 (04), 373–385. <https://doi.org/10.4236/ars.2013.24040>
- Álvarez, A.; Baños, R. y Otero, L. (2008). Salinidad y uso de aguas salinas para la irrigación de cultivos y forrajes en Cuba. *Ciencia y Tecnología Ganadera*, vol. 2, no. 1, p. 1-12
- Ando, M., Radanielson, Olivyn A., Tao, Li., Abdelbagi, M. Ismail. y Donald, S. (2018). Describing the physiological responses of different rice genotypes to salt stress using sigmoid and piecewise linear functions. *Field Crops Research*. 46-56. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429017307578.
- Argentel, L., González, L. M., López, R., Fonseca, I. y Girón, R. (2008). Efecto de la salinidad sobre la fenología, los componentes del rendimiento y su relación con la tolerancia varietal a la salinidad en trigo (*Triticum aestivum* y *T. durum*). *Cultivos Tropicales*. 29(3), 53-57. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193221653010>

- Asch, F. & Wopereis, M.C. (2001). Responses of field-grown irrigated rice cultivars to varying levels of floodwater salinity in a semi-arid environment. *Field Crop*. 70: 127-137.
- Baby, J. & Jini, D. (2010). Salinity Induced Programmed Cell Death in Plants: Challenges and Opportunities for Salt-tolerant Plants. *Journal of Plant Sciences*, 5: 376-390.
- Bado, S., Forster, B. P., Abdelbagi, G. M., Jankowicz-cieslak, J., Berthold, G., & Luxiang, L. (2016). Protocols for Pre- Field Screening of Mutants for Salt Tolerance in Rice, Wheat and Barley. Vienna, Austria: *International Atomic Energy Agency*. <http://doi.org/10.1007/978-3-319-26590-2>
- Beltrano, J, Ruscitti, M, Arango, M.C, & Ronco, M. (2013). Effects of arbuscular mycorrhiza inoculation on plant growth, biological and physiological parameters and mineral nutrition in pepper grown under different salinity and p levels. *Journal of soil science and plant nutrition*, 13(1), 123-141.<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162013005000012>
- Castillo, E.G., Tuong, T.P., Ismail, A.M & Inubushi, K. (2007). Response to salinity in rice: comparative effects of osmotic and ionic stresses. *Plant Prod. Sci.* 159-170
- Castro, C. V. (2006). *Composición nutricional de materias primas utilizadas en la alimentación animal en Costa Rica: Un estudio preliminar para la elaboración de la tabla de composición de alimentos para animales de Costa Rica* [Tesis de pregrado]. Universidad de Costa Rica.
- Catalá, M., Domingo, C., Eixarch, M. M., Tomas, N., Pla, E y Bertomeu, A. (2019a). Impacto de la salinidad en las principales variedades de arroz cultivadas en España. Recuperado de: <https://www.agronegocios.es/impacto-de-la-salinidad-en-las-principales-variedades-de-arroz/>
- Catalá, M. M., Domingo, C., Martínez-Eixarch, M., , Tomàs, N., , Bertomeu A., Montero, P., , Cabanes, P., y Pla, E. (2019b). Tolerancia varietal del arroz a la salinidad. *Agrícola Vergel*
- Cabalceta, G., y Cordero, Á. (1991). Efectos de salinidad en arroz bajo riego en Guanacaste, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 15(112), 167–172.
- Chavarría, L. P. (2011). *Crecimiento y absorción en nutrimentos en dos cultivares de arroz (Oryza sativa L.) en la Región Pacífico Central* [Tesis de pregrado]. Universidad de Costa Rica.
- Chaudhary, R., Nanda, J., y Tran, D. (2018). Problemas y limitaciones de la producción de arroz. Salinidad. <http://www.fao.org/3/y2778s/y2778s04.htm#TopOfPage>
- Chinnusamy, V. A. Jagendore, Z & Jian-Kang.(2005).Understanding and Improving Salt tolerance in plants.
- Contreras, F.,Viña , B., Sakadevan, K y Muraoka, T. (2015). Aprovechamiento de nitrógeno mineral (15N-urea) y eficiencia del fraccionamiento del fertilizante en el cultivo de arroz. *Agropecuaria y Forestal*. 4(2), 13-16.

- Contreras, S y López, P. (2009). El diseño de bloques al azar en la investigación agroecológica. *Asamblea Nacional de Rectores*. Área de Ciencias. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. Perú.
- Corporación Arrocera Nacional (2018). *Informe estadístico período 2017/2018*. https://www.conarroz.com/UserFiles/File/INFORME_ANUAL_ESTADISTICO PERIODO_2017%202018.pdf
- Corporación Arrocera Nacional, Costa Rica (2020). *Informe Anual, Período 2020*. https://www.conarroz.com/userfile/file/INFORME_ANUAL_ESTADISTICO_PERIODO_2019_2020.pdf
- Cortés, V. G y Real, G. S. (2007). Some effects of salinity on the tomato cultivars and agronomic practices in its managing. Volumen 25, N° 3, Páginas 47-58 <https://scielo.conicyt.cl/pdf/idesia/v25n3/art06.pdf>
- Cristo, E., & González, M., & Cárdenas, R., & Pérez, N. (2001). Evaluación de la tolerancia a la salinidad en el estado juvenil de tres nuevas líneas de arroz (*Oryza sativa* L.) utilizando marcadores morfoagronómicos. *Cultivos Tropicales*, 22 (2), 43-45.
- Cristo, E., González, M. C., Cárdenas, Regla, M., y Pérez, N. (2004). Comportamiento de un grupo de variedades cubanas de arroz (*oriza sativa* l.) En suelos afectados por sales. *Cultivos Tropicales*. 25(4). 65-68. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193225911007>
- Cristo, V. E., Gonzales, M., Ventura, E & Rodriguez, T, A. (2018). Effect of salinity in the initial stages of the development of three rice cultivars (*Oryza sativa* L.). *Cultivos Tropicales*, vol. 39, núm. 3, pp. 65-70.
- DellAmico, C. J. M, Morales, D, & Polón, R. (2008). Inducción de respuestas adaptativas en el arroz (*Oryza sativa* L.) para su cultivo en condiciones de salinidad moderada. *Cultivos Tropicales*, 29(4), 61-66. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362008000400009&lng=es&tlng=es.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., y Robledo, C. W. (2018). InfoStat, versión 2017. Grupo InfoStat. FCA. Universidad Nacional de Córdoba.
- Dugan. A. (2015). Rice. Volatile Compounds in Foods and Beverages, 79–89. <https://doi.org/10.1201/9780203734285>
- Espinoza, R. H., Gutiérrez, V. L., Amador, B. M., Morales, B. A y Montiel, H. G. (2014). Respuesta diferencial a la salinidad de genotipos de tomate (*lycopersicon esculentum* mill.) en primeras etapas fenológicas. *Terra Latinoamericana* 32: 311-323. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v32n4/2395-8030-tl-32-04-00311.pdf>
- example. *Plant Breeding*, 132, 433–436.

- Fernandez, A. A. (2020). Selección de mutantes de arroz (*Oryza sativa*) con tolerancia a la salinidad obtenidos por radiación gamma. [Tesis de grado]. Universidad Nacional
- Gaibor, J. C. (2019). *Comportamiento de la planta de arroz (Oryza sativa L.) según su estado fenológico a distintos niveles de salinidad* [Tesis de pregrado]. Universidad Técnica de Babahoyo.
- Gain, P., Mannan, M. A., Pal, P. S., Hossain, M & Parvin, S. (2004). Effect of Salinity on Some Yield Attributes of Rice. *Pakistan Journal of Biological Sciences*.
- García, M. y E. Medina. 2010. Crecimiento y morfología radical en dos genotipos de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) sometidos a salinización con sales simples o suplementadas con calcio. *Revista de la Facultad de Agronomía*. 27: 17-38.
- García, P. M., García, M. J y Quito, M. C. (2019). Efecto de la salinidad por NaCl en el crecimiento y desarrollo de plantas de *Chenopodium quinoa* Willd. *Ciencia en Desarrollo*, 10(1), 19-29. <https://doi.org/10.19053/01217488.v10.n1.2019.8341>
- Ghosh, B., Ali, M. N y Saikat, G. (2016). Response of Rice under Salinity Stress: A Review Update. *J Res Rice*. 4:167. doi: 10.4172/2375-4338.1000167
- González, J. S., Castillo, G. A., García, M. R., Valdez, A. L., Ybarra, M. C & Avitia, G. E. (2020). Respuesta de fresa cv. Festival a la salinidad. *Revista fitotecnia mexicana*, 43(1), 53-60. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.1.53>
- Gonzales, M y García, A. (1997). Detección de posibles marcadores morfológicos para la selección temprana de genotipos de arroz tolerantes a la salinidad. *Cultivos tropicales*. 18 (3): 87-90.
- González, A., y González S. (2000). Notas sobre R: Un entorno de programación para Análisis de Datos y Gráficos Versión 1.0.1. Recuperado de: <https://cran.r-project.org/doc/contrib/R-intro-1.1.0-espanol.1.pdf>
- González, L. M., González, M. C y Ramírez, R. (2002). Aspectos generales sobre la tolerancia a la salinidad en las plantas cultivadas. *Cultivos Tropicales*. Vol. 23.
- Google Earth. (2019). Ubicación Invernadero, Finca Experimental Santa Lucía, Heredia
- Grattan, S.R., Zeng, L., Shannon, M. C., & Roberts, S.R. (2002). Rice is more sensitive to salinity than previously thought. *California Agriculture*. 56, 189–195.
- Grimaldo, P., Niu, G., Sun, Youping., Rocha, C. A., Parrilla, C. A., Margez, F. J., Díaz, C. B y Ávila, O. P. (2017). Negative effect of saline irrigation on yield components and phytochemicals of pepper (*capsicum annuum*) inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi. *Fitotecnia Mexicana*, vol. 40, núm. 2, pp. 141-149, 2017

- Haboudane, D & Jawerth, N. (2019). From Lab to Field: Indonesian Scientists Develop New Crops for Farmers Using Nuclear Science. <https://www.iaea.org/newscenter/news/from-lab-to-field-indonesian-scientists-develop-new-crops-for-farmers-using-nuclear-science>
- Hakim, M. A., Juraimi, A. S., Hanafi, M. M., Ismail, M. R., Rafii, M. Y., Islam, M. M & Selamat, A. (2014). The effect of salinity on growth, ion accumulation and yield of rice varieties. *The Journal of Animal and Plant Sciences*.
- Hernández, L. M., Álvarez, B. D., Martínez, S. H., Estrada, O. S y Cárdenas, C. G. (2017). Efecto de la salinidad en la germinación y emergencia de siete especies forrajeras. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(6), 1245-1257. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S200709342017000601245&lng=es&tlng=es.
- Hussain, S., Jun-hua, Z., Chu, Z., Lian-feng, Z., Xiao-chuang, C., Sheng-miao, Y., James, B. A., Ji-jie, H & Qian-yu, J. (2017). Effects of salt stress on rice growth, development characteristics, and the regulating ways. *Journal of Integrative Agriculture*. 16(11): 2357–2374
- Hussain, M., Ahmad, S., Hussain, S., Lal, R., Ul-Allah, S., & Nawaz, A. (2018). Rice in Saline Soils: Physiology, Biochemistry, Genetics, and Management. *Advances in Agronomy*. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.11.002>
- Instituto meteorológico Nacional de Costa Rica. (2018). Meteorológico mensual. Recuperado de: <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/454290/ENERO>
- IRRI, I. (2002). Standard evaluation system for rice. *International Rice Research Institute, Philippine*, 1-45.
- Islam, M., Islam, A & Biswas, J. (2017). Effect of Gypsum on Electrical Conductivity and Sodium Concentration in Salt Affected Paddy Soil. *International Journal of Agricultural Papers*. 2. 19-23.
- Jamil, M., Bashir, S., Anwar, S., Bibi, S., Bangash, A., Ullah, F & Rha, E. S. (2012). Effect of salinity on physiological and biochemical characteristics of different varieties of rice. *Journal of Botany*. 44. 7-13
- Jennings, P., Coffman, W., & Kauffman, H. (1981). Mejoramiento de arroz. Centro Internacional de Agricultura Tropical.
- Khatun, S & flowers, T. J. (1995). Effects of salinity on seed set in rice. *Plant, Cell and Environment*. 18(1). 61–67. doi:10.1111/j.1365-3040.1995.tb00544.x
- Khush. (2013). Strategies for increasing the yield potential of cereals: case of rice as an
- Kumar, K., Kumar, M., Kim, S.R., Ryu, H & Cho, Y.G. (2013). Insights into genomics of salt stress response in rice. *Rice*, 6(1): 27

- Lamz Piedra, Alexis, Reyes Guerrero, Yanelis, & González Cepero, María C. (2013). Indicadores bioquímicos para la selección temprana de genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.) con tolerancia a la salinidad. *Cultivos Tropicales*, 34(1), 11-17. Recuperado en 03 de agosto de 2021, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362013000100002&lng=es&tlng=es.
- Lara, A. P. (2019). Guía R-Studio. Universidad de Granada. Recuperado de: <http://wpd.ugr.es/~bioestad/guia-r-studio/>
- Layne, J. A., Méndez, N. J, y Mayz, F. J (2008). Efecto de la salinidad y del tamaño de la semilla sobre la germinación y crecimiento de plántulas de maíz (*zea mays* l.) Bajo condiciones de laboratorio. *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*. 11(1),17-25. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43211943002>
- López, S., Gómez, P. E., Campos, P. R., Eichler, L. B, Rodríguez, L. L., Guevara, H. F., y Gongora, M. G. (2018). Afectaciones en el rendimiento de líneas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) provocado por salinidad. *Cultivos Tropicales*, 39(1), 74-80. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S025859362018000100009&lng=es&tlng=es.
- Manchanda, G & Garg, N. (2008). Salinity and its effects on the functional biology of legumes. *Acta Physiologiae Plantarum*, 30 (5), 595–618. 10.1007 / s11738-008-0173-3
- Martínez, A., Garatuz L., Payán, J., González, Y., Enrico A., Santos-Villalobos, S. (2016). Evaluación de la tolerancia de variedades mexicanas de trigo a la salinidad, a través de indicadores fisiológicos, bioquímicos y agronómicos, cultivadas en cuba en condiciones de campo. *Cultivos Tropicales*. 37(1), 91-101. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193245041013>
- Mass, E & Hoffman, G.J. (1977). Crop Salt Tolerance-Current Assessment. Agricultural Research Service.
- Mesa, D. (2003) Obtención de plantas resistentes a la salinidad para los suelos salinos cubanos. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 37(3). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193018048001>
- Miranda (2009). Variedades comerciales de arroz (*Oryza sativa*). <http://www.platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/00/00260-variedadesarroz.pdf>
- Mondal, S & Borromeo, T. H. (2016). Screening of salinity tolerance of rice at early seedling stage. *Journal of Bioscience and Agriculture Research*. 10(01), 843-847. 10.18801/jbar.100116.102
- Montes de Oca, P., Mata, R., & Chaves, M. (1996). Estudios de salinidad en la provincia de Guanacaste (Costa Rica) y caracterización de algunos suelos con influencia salina. *Agronomía mesoamericana*, 7(2), 77–83.

- Mora, F.C., Pando, G.L., Borja, W.R y Moran, H.E. (2020). Evaluación de la tolerancia a la salinidad en poblaciones segregantes F5 de arroz (*Oryza sativa* L.). *Journal of science and research*. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4421516>
- Morales, D., Rodríguez, P., Sánchez, B., María, J y Torrecillas, A. (2004). Efecto del estrés por NaCl en el crecimiento y las relaciones Hídricas de diferentes variedades de arroz. *Cultivos Tropicales*. 25(4),11-16. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193225911015>
- Morales, D., Bolarín, Ma. C., Cayuela, E. (2006) Respuesta de plantas de arroz (*Oryza sativa* L.) a la aplicación de diferentes niveles de NaCl. Crecimiento y relaciones hídricas. *Cultivos Tropicales* 27(4) en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193215912004>
- Morales, O., Gonzáles, L.M., Leyva, Y.R., Ortiz, A., Mojena, R y Duany, A. (2000). Alternativas para el manejo de suelos arroceros afectados por salinidad y/o sodicidad. Parte III: tolerancia de nuevas líneas y variedades de arroz a la salinidad y sodicidad. *Instituto de Investigaciones Agropecuarias, La Habana, Cuba*. [http://www.actaf.co.cu/revistas/revista-grano/Revista%20en%20PDF%20\(Vol%206%20No%202\)/Trabajo5.pdf](http://www.actaf.co.cu/revistas/revista-grano/Revista%20en%20PDF%20(Vol%206%20No%202)/Trabajo5.pdf)
- Munns, R & Tester, M. (2008). Mechanisms of Salinity Tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59(1). 651–681. [10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911](https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911)
- Nasser, P. S (2017). Effect of Ca^{2+} on some growth variables from Aloe vera grown on NaCl. *Biota Colombiana*, vol. 18, núm. 2, pp. 41-49. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.21068/c2017.v18n01a3>
- Núñez, M., & Mazorra, L., & Martínez, L., & González, M., & Robaina, C. (2007). Análogos de brasinoesteroides revierten parcialmente el impacto del estrés salino en el crecimiento inicial de las plántulas de dos genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.). *Cultivos Tropicales*, 28 (2), 95-99.
- Olmos, S. (2007). Apunte de morfología, fenología, eco fisiología, y mejoramiento genético del arroz. Cátedra de Cultivos II Facultad de Ciencias Agrarias, UNNE.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2014). *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2016). *Alianza Mundial Por El Suelo*. <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2017). El futuro de la tendencia alimentación y desafíos. <https://www.fao.org/3/i6881s/i6881s.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2020). *Mercados Mundiales de la Alimentación*. <https://www.fao.org/news/story/es/item/1287612/icode/>

Orosco-Alcalá, B.E; Núñez-Palenius, H.G; Pérez-Moreno, L.; Valencia-Posadas, M; Trejo-Téllez L.; Díaz-Serrano, F.R; Ruiz-Nieto, J.E; Abraham-Juárez, M.R. (2018). Tolerance to salinity in cultivated plants: an agronomic vision. : Vol. 11, Núm. 7, pp: 51-57.

Parés, J y Basso, C. (2013). Efecto del cloruro de sodio sobre el crecimiento y estado nutricional de plantas de papaya. *Bioagro*, 25(2), 109-116. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612013000200004&lng=es&tlng=pt.

Parihar, P., Singh, S., Singh, R., Singh, V. P., & Prasad, S. M. (2015). Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. 22(6), 4056–4075. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3739-1>

Pernús, M & Sánchez, J. A. (2015). Salinity in Cuba and pre-germination hydration- dehydration treatments of seeds. *Pastos y forrajes*, 38(4), 379-392.

Piedra, A y González, M. (2013). La salinidad como problema en la agricultura: la mejora vegetal una solución inmediata. *Cultivos Tropicales*, 34(4), 31–42. <http://bd.univalle.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fua&AN=89059606&lang=es&site=eds-live>

Piedra, L. A. & González, M. C. (2015). Indicators of initial growth and nutritional status for early selection genotypes of rice (*Oryza sativa*. L) salt tolerant. *Cultivos Tropicales*, 36(2), 41–48. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12749.23521>

Pirola, M. J (2018). Estudio del efecto de la salinidad en la germinación y floración de *Arabidopsis thaliana*. [Tesis de grado]. Universidad Argentina De La Empresa

Porras, E. (2013). *Respuesta del arroz (Oryza sativa. L) cultivar c-7 a tres densidades de siembra, cuatro niveles de nitrógeno y dos niveles de potasio en siembra de verano en finca La Vega, San Carlos*. [Tesis de pregrado, Instituto Tecnológico de Costa Rica].

Quirós, R.G. (1976). Memoria. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Memoria-1976.pdf>

Quintana, B. A., Sandoval, H.E., y Torres, F. D. (2016). Evaluación del crecimiento de frijol (*phaseolus vulgaris* l.) cv ica cerinza, bajo estrés salino. *U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 19 (1): 87 – 95. <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v19n1/v19n1a10.pdf>

Reddy, I.N., Kim, B., Yoon, I., Kim, K & Kwon, T. (2017). Salt Tolerance in Rice: Focus on Mechanisms and Approaches. *Rice Science*. 123-144. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2016.09.004>.

Reig, V. L. (2019). *Estudio de polimorfismos asociados a caracteres de interés agronómico en arroz (Oryza sativa L.) mediante técnicas de análisis genómico*. [Tesis Doctoral]. [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/117993/Reig%20-%20Estudio%20de%20polimorfismos%20asociados%20a%20caracteres%20de%20inter%C3%99s%20agr%C3%93nomico%20en%20arroz%20\(Oryza%20sativa%20L.\)%20mediante%20t%C3%A9cnicas%20de%20an%C3%A1lisis%20gen%C3%B3mico%20.pdf](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/117993/Reig%20-%20Estudio%20de%20polimorfismos%20asociados%20a%20caracteres%20de%20inter%C3%99s%20agr%C3%93nomico%20en%20arroz%20(Oryza%20sativa%20L.)%20mediante%20t%C3%A9cnicas%20de%20an%C3%A1lisis%20gen%C3%B3mico%20.pdf)

A9s%20agron%C3%B3mico%20en%20arroz%20%28Oryza%20sati....pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Reyes, Yanelis, Mazorra, L. M, & Núñez, Miriam. (2008). Aspectos fisiológicos y bioquímicos de la tolerancia del arroz al estrés salino y su relación con los brasinoesteroides. *Cultivos Tropicales*, 29(4), 67-75. Recuperado en 18 de septiembre de 2021, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362008000400010&lng=es&tlng=es.
- Rodríguez, E.M., Ledesma, N.D., Sevillano, C.N & Medina, M. E.(2019).Effect of salinity stress in growth and relative water content in *Oryza sativa* “rice”, var. IR-43 and amazonas (Poaceae). *Arnaldoa*. 26 (3).931-942.<http://doi.org/10.22497/arnaldoa.263.26305>
- Rodríguez, H. M. (2019). Effect of salinity stress in growth and relative water content in *Oryza sativa* “rice”, var. IR-43 and amazonas (Poaceae). *Arnaldoa* 26 (3): 931-942. doi.org/10.22497/arnaldoa.263.26305
- Rodríguez-Delfín, Alfredo, Posadas, Adolfo, & Quiroz, Roberto. (2014). Rendimiento y absorción de algunos nutrimentos en plantas de camote cultivadas con estrés hídrico y salino. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 20(1), 19-28. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2013.01.001>
- Saavedra, S. J. (2020). Reacción de 44 líneas f5 de arroz (*Oryza* sp), a la calidad de agua de riego en la zona de Manglaralto. [Tesis de pregrado]. Universidad Estatal Península de Santa Elena.
- Saeed, M. (2018). Abiotic Stress Tolerance in Rice (*Oryza sativa* L.): A Genomics Perspective of Salinity Tolerance. *Rice Crop - Current Developments*, 181-188. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.69831>
- Safitri, H., Purwoko, D.S., Dewi, I.S & Ardie, S.W. (2017). Salinity tolerance of several rice genotypes at seedling stage. *Journal of Agricultural Science*. Vol. 18 No. 2. 63–68 <http://dx.doi.org/10.21082/ijas.v.18.n2.2017.p>.
- Saldaña, M. T., Bejarano, C. A y Guaqueta, S. (2017). Efecto de la salinidad en el crecimiento de plantas de tomate tipo chonto. *Ciencias hortícolas* - Vol. 11 - No. 2 - pp. 329-342. <http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2017v11i2.7347>
- Sam, O. (2007) influencia de la salinidad en las radículas de plántulas de arroz (*Oryza sativa*). *Cultivos Tropicales* (1):25-28. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193215858004>
- Samant, A & Jawali, N. (2016). Early seedling stage salt tolerance evaluation of genetically diverse rice genotypes. *Annals of biological research*. 46-54
- Shahbaz, M. & Ashraf, M. (2013). Improving Salinity Tolerance in Cereals. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 32(4), 237–249. <https://doi.org/10.1080/07352689.2013.758544>

- Shannon MC (1998) Adaptation of plants to salinity. *ScienceDirect*. 60: 75-120.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S006521130860601X>
- Shereen, A., Mumtaz, S., Raza, S., Khan M A & Solangi, S. (2005.) Salinity effects on seedling growth and yield components of different inbred rice lines. *Pakistan Journal of Botany*. 37, 131–139.
- Sigueñas, R., Ocola, L y Guerrero, J. (2019). Vigilancia de la salinidad del suelo en cultivos de arroz en Lambayeque, periodo 2001-2014 utilizando imágenes de satélite y conductividad eléctrica. *Revista de Investigación de Física* 22(2). https://fisica.unmsm.edu.pe/rif/previo_files/2019-2/02siguenas.pdf
- Silvera, B. D. (2017). Mutaciones mediante radiaciones gamma en arroz. *Observatorio de la Economía Latinoamericana, Ecuador*. <http://www.eumed.net/cursecon/ecolat/ec/2017/mutaciones-arroz-ecuador.html>
- Terrazas, R. M. (2019). Aprovechamiento del suelo salino: agricultura salina y recuperación de suelos. *APTHAPI* http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?pid=S0102-03042019000100016&script=sci_arttext
- Tinoco, M., y Acuña, C. (2009). Manual de recomendaciones técnicas del cultivo de arroz (*Oryza sativa*). http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual/bibliotecavirtual/a00177.pdf
- Valdés, C.E., Cepero, G.C & León, P.N. (2012). Behaviour of promissory rice genotypes (*Oryza sativa* L.) for saline soil. *Cultivos Tropicales*. 42-46
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193223814006>
- Vásquez, A. (1975). Estudio semidetallado de suelos Cuenca Baja del Río Tempisque. In ICE-MAG-SNE.
- Vásquez, A., & Chaves, F. C. (1976). Evaluación de los recursos de tierras y aguas con fines de riego de los terrenos del Ingenio TABOGA S. A., Cañas, Guanacaste.
- Villafañe, R. (2000). Calificación de los suelos por sales y dispersión por sodio y su aplicación en la evaluación de tierras. *Agronomía Tropical*, 50(4), 645–658.
- Villavicencio, M. N., Alonzo, L. C., Sotelo, B. M y Leal, P. R. (2011). Efectos de la salinidad en el desarrollo vegetativo. *Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable*. Vol. V, No. 3
- Wicke, B., Smeets, E., Domburg, V., Vashev, B., Gaiser, T., Turkenburg, W., & Faaij A. (2011). The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils. *Energy & Environmental Science*, (4) 2669–2681. 10.1039/c1ee01029h
- Wopereis, M.C., Bouman, B.A., Tuong, T.P., Berge, H.F & Kropff, M.J. (1996). ORYZA_W: rice growth model for irrigated and rainfed environments. 159.
- Yoshida, S., Forno, D., Cock, J., & Gómez, K. (1976). Laboratory manual for physiological studies of rice. 83.

- Zambrano, B. M. (2021). Influencia de las sustancias húmicas en el desarrollo inicial de dos variedades de arroz, sometidas a estrés salino. [Tesis de pregrado]. Universidad Estatal Península de Santa Elena.
- Zidor, E., Cajou, J., Viña, B., Contreras, F y Avilés, E. (2016). Comportamiento de genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.) en diferentes niveles de salinidad de suelos de la región noroeste de la República Dominicana. *Revista APF*

8. ANEXOS

Anexo 1. Ubicación satelital mediante el programa informático Google Earth del invernadero en la Finca experimental Santa Lucia utilizado para el desarrollo de la investigación



Anexo 2. Resultados de la evaluación del crecimiento promedio de los materiales de arroz en estado de plántula. Comparación de medias DGC (Alfa=0,05). Letras distintas indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$).

Resultados para el modelo: mlm.modelo.006_Altura.de.la.planta_REML

Variable dependiente: Altura.de.la.planta

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2_0	R2_1
120	459,42	486,61	-219,71		1,50	0,19 0,34

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	104	10455,46	<0,0001
Momento	1	104	17,15	0,0001

Tratamiento	3	8	1,10	0,4042
Momento:Tratamiento	3	104	0,80	0,4973

Altura.de.la.planta - Medias ajustadas y errores estándares para Momento

DGC (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Momento	Medias	E.E.	
Después	25,53	0,28	A
Antes	24,40	0,28	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 3. Longitud radicular promedio de las plántulas de arroz.Comparación de medias DGC (Alfa=0,05). Letras distintas indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$).

Resultados para el modelo: mlm.modelo.009_Longitud.de.la.raiz_REML

Variable dependiente: Longitud.de.la.raiz

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2_0	R2_1
120	541,63	571,54	-259,82		1,30	0,31 0,33

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	104	3042,89	<0,0001
Momento	1	104	45,50	<0,0001
Tratamiento	3	8	1,58	0,2681
Momento:Tratamiento	3	104	0,17	0,9145

Longitud.de.la.raiz - Medias ajustadas y errores estándares para Momento

DGC (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Momento	Medias	E.E.	
Después	16,93	0,49	A
Antes	13,47	0,20	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 4. Producción promedio de hojas de las plantas de arroz en estado de plántula.Comparación de medias DGC (Alfa=0,05). Letras distintas indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$).

Resultados para el modelo:

Variable dependiente: Numero.de.hojas

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2_0	R2_1
120	254,52	281,71	-117,26		0,63	0,36 0,36

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	104	5643,09	<0,0001
Momento	1	104	51,09	<0,0001
Tratamiento	3	8	2,80	0,1085
Momento:Tratamiento	3	104	1,38	0,2521

Numero.de.hojas - Medias ajustadas y errores estándares para Momento

DGC (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Momento	Medias	E.E.	
Después	4,70	0,08	A
Antes	3,88	0,08	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 5. Evaluación del crecimiento aéreo de las plantas de arroz en estado adulto.

Resultados para el modelo: mlm.modelo.011_Altura_REML

Variable dependiente: Altura

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2_0	R2_1
120	721,92	749,10	-350,96		4,76	0,20 0,42

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	104	6706,43	<0,0001
Momento	1	104	0,29	0,5924
Tratamiento	3	8	2,32	0,1519

Momento:Tratamiento	3	104	0,23	0,8765
---------------------	---	-----	------	--------

Anexo 6. Evaluación del vigor vegetativo en los materiales utilizados en etapa adulta. Comparación de medias DGC (Alfa=0,05). Letras distintas indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$).

Resultados para el modelo: `mlm.modelo.013_Numero.de.macollas_REML`

Variable dependiente: Numero.de.macollas

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
120	936,30	960,77	-459,15	13,25	0,35	

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	1603,66	<0,0001
Momento	1	4,74	0,0316
Tratamiento	3	18,89	<0,0001
Momento:Tratamiento	3	0,02	0,9960

Numero.de.macollas - Medias ajustadas y errores estándares para Momento

DGC (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Momento	Medias	E.E.	
después	51,07	1,71	A
Antes	45,80	1,71	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Numero.de.macollas - Medias ajustadas y errores estándares para Tratamiento

DGC (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Tratamiento	Medias	E.E.	
Testigo	64,07	2,42	A
400-29	44,83	2,42	B
400-13	43,37	2,42	B
400-15	41,47	2,42	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 7. Producción de biomasa total de las plantas de arroz sometidas a dos periodos de estrés, expresado en gramos (g).

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
12	84,92	85,32	-37,46	19,86	0,26	

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	125,30	<0,0001
Tratamiento	3	0,93	0,4693

Anexo 8. Longitud de la panícula promedio en las plantas de arroz. Comparación de medias DGC (Alfa=0,05). Letras distintas indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$).

Resultados para el modelo:

Variable dependiente: Paniculas

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
12	81,82	82,22	-35,91	16,37	0,45	

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	487,98	<0,0001
Tratamiento	3	2,18	0,1683

L.Panicula.cm - Medias ajustadas y errores estándares para Tratamiento

DGC (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Tratamiento	Medias	E.E.	
Testigo	22,93	0,27	A
400-13	22,41	0,27	A
400-29	22,40	0,27	A
400-15	21,58	0,27	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 9. Producción de granos promedio por panícula en las plantas de arroz. Comparación de medias DGC (Alfa=0,05). Letras distintas indican diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$).

Resultados para el modelo:

Variable dependiente: Numero.de.granos.por.panic

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2_0
12	65,43	65,83	-27,72	5,88	0,85

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	8302,64	<0,0001
Tratamiento	3	14,60	0,0013

Numero.de.granos.por.panic - Medias ajustadas y errores estándares para Tratamiento DGC (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Tratamiento	Medias	E.E.	
400-13	163,73	3,39	A
Testigo	162,87	3,39	A
400-29	155,80	3,39	A
400-15	135,87	3,39	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 10. Resultados para peso de 100 granos llenos de las plantas de arroz.

Resultados para el modelo: mlm.modelo.016_Peso.de.100.granos.llenos_REML

Variable dependiente: Peso.de.100.granos.llenos

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2_0
12	-3,69	-3,29	6,85	0,08	0,49

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
--	-------	---------	---------

(Intercept)	1	8853,18	<0,0001
Tratamiento	3	2,59	0,1257

Anexo 11. Porcentaje de esterilidad de cada uno de los materiales.

Resultados para el modelo: mlm.modelo.020_Porcentaje.de.esterilidad_REML

Variable dependiente: Porcentaje.de.esterilidad

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
12	63,14	63,54	-26,57	5,09	0,05	

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	4115,31	<0,0001
Tratamiento	3	0,14	0,9303

Anexo 12. Producción promedio de cada uno de los materiales.

Resultados para el modelo: mlm.modelo.018_Rendimiento.por.linea.gra_REML

Variable dependiente: Rendimiento.por.linea.gra

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
12	73,78	74,18	-31,89	9,90	0,26	

AIC y BIC menores implica mejor

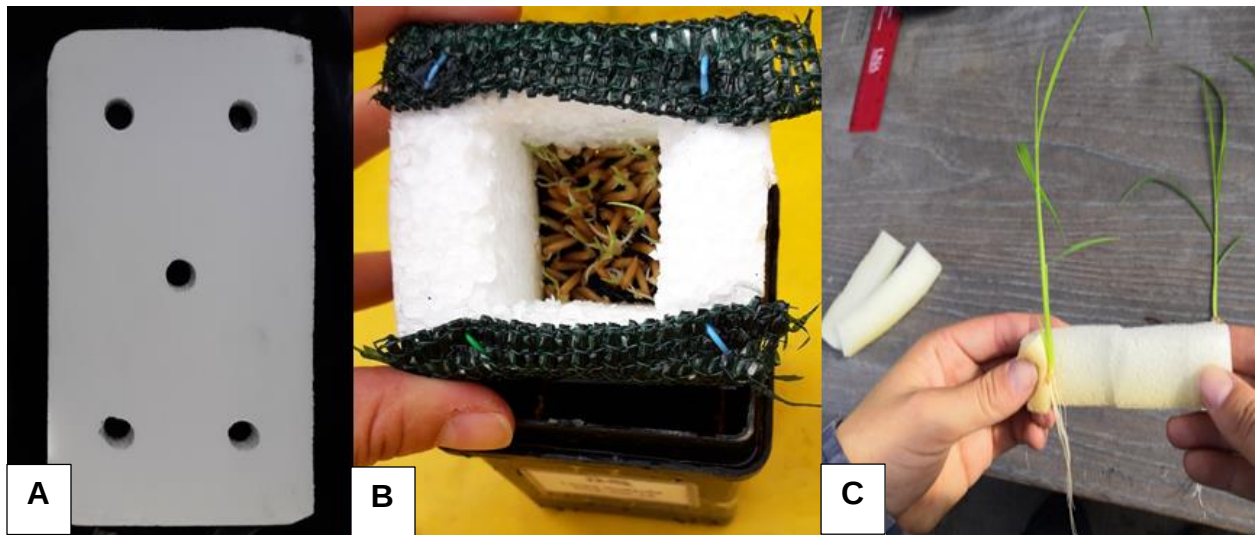
Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	116,77	<0,0001
Tratamiento	3	0,92	0,4742

Anexo 13. Tanque de almacenamiento tricapa para la solución nutritiva, ubicado a 1.5 metros de altura.



Anexo 14. A. Láminas de estereofón para soporte de plantas, B. Soporte de semillas para germinación en pots con lámina de estereofón y malla nylon, C. Esponja hidropónica como soporte de plantas.



Anexo 15. A. Medición de cada solución madre. B. Preparación de solución nutritiva Yoshida en tanque de almacenamiento.



Anexo 16. A. Potes para el proceso de germinación de semillas de cada material a evaluar, B. Bandejas utilizadas para el desarrollo del cultivo.



Anexo 17. Medición de la altura de la planta desde la base del tallo a la punta de la hoja más alta.



Anexo 18. Medición de la raíz de la plántula de arroz, desde la base del tallo hasta la punta de la raíz más larga.



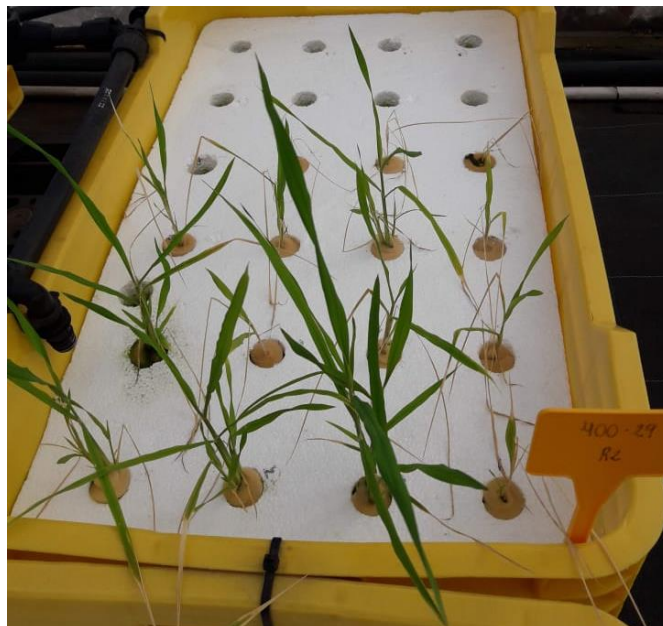
Anexo 19. Selección de plántulas de arroz para conteo de hojas.



Anexo 20. Blanqueamiento de las puntas del arroz en estado de plántula sometido a estrés salino.



Anexo 21. Materiales sometidos al primer periodo de estrés salino.



Anexo 22. Materiales sometidos a estrés salino en la etapa reproductiva.



Anexo 23. A. Cochecha manual de cada material, B. Muestras del material vegetal para determinar biomasa total producida.

