UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA

Bacillus velezensis como bioinoculante para tolerancia a la salinidad en semillas y plántulas de _Oryza sativa_ l. (arroz.) Tumbes 2025.

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Agrónomo

AUTOR

Br. Erwin Saúl Rosillo Urbina

Tumbes, 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA

***Bacillus velezensis* como bioinoculante para tolerancia a la salinidad en semillas y plántulas de *Oryza sativa* l. (arroz.) Tumbes 2025.**

Tesis aprobada en forma y estilo por:

Dr. Carlos Alberto Deza Navarrete (presidente) _____

Código ORCID: 0000-0003-0592-1821

Mg. Víctor Manuel Saavedra Chávez (secretario) _____

Código ORCID: 0000-0002-570-4211

Dr. Ramon García Seminario (vocal) _____

Código ORCID: 0000-0003-0756-0935

Tumbes, 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA

***Bacillus velezensis* como bioinoculante para tolerancia a la salinidad en semillas y plántulas de *Oryza sativa* l. (arroz.) Tumbes 2025.**

Los suscritos declaramos que la tesis es original en su contenido y forma:

Br. Erwin Saúl Rosillo Urbina
Código ORCID: 0009-0008-5011-7588
AUTOR:

Dr. Ramon García Seminario
Código ORCID: 0000-0003-0756-0935
ASESOR:

MS.c. José Stalyn Córdova Campos
Código ORCID: 0000-0002-5891-4679
CO- ASESOR:

Tumbes, 2026

COPIA DEL ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
EX FUNDO FISCAL LA CRUZ-CAMPUS UNIVERSITARIO
SECRETARIA ACADÉMICA

"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PRESENCIAL

En Tumbes, a los veintinueve días del mes de enero de dos mil veintiséis, siendo las nueve horas, con treinta minutos (9.30 a.m.), de la mañana, de forma presencial, se reunieron en el aula 2 de la Facultad de Ciencias Agrarias, el Jurado Calificador, designado por Resolución Nº 026-2025/UNTUMBES-VRACAD-FCA-D, **Dr. Carlos Alberto Deza Navarrete** (Presidente), **Mg. Víctor Manuel Saavedra Chávez** (Secretario), **Dr. Ramón García Seminario** (Vocal), reconociendo en la misma resolución además, al **Dr. Ramón García Seminario,** como **Asesor** y al **MS.c. José Stalyn Córdova Campos**, como **Co-asesor** se procedió a evaluar, calificar y deliberar la sustentación de la tesis, **"*Bacillus velezensis* como bioinoculante para tolerancia a la salinidad en semillas y plántulas de *Oryza sativa* L (Arroz.) Tumbes 2025",** para optar el Título Profesional de Ingeniero Agrónomo presentado por el **Bach. Erwin Saúl Rosillo Urbina,** Concluida la sustentación y absueltas las preguntas, por parte del sustentante y después de la deliberación, el jurado según el artículo Nº 75 del Reglamento de Tesis para Pregrado y Posgrado de la Universidad Nacional de Tumbes, declara al: **Bach. ERWIN SAÚL ROSILLO URBINA,** Aprobado, por Unanimidad, con el calificativo de muy bueno.

Se hace conocer al sustentante, que deberá levantar las observaciones finales hechas al informe final de tesis, que el jurado le indica.

En consecuencia, queda apto para continuar con los trámites correspondientes a la obtención del Título Profesional de Ingeniero Agrónomo, de conformidad con lo estipulado en la Ley Universitaria Nº 30220, el Estatuto, Reglamento General, Reglamento General de Grados y Títulos y Reglamento de Tesis de la Universidad Nacional de Tumbes.

Siendo las 10 horas y 45 minutos del mismo día, se dio por concluida la ceremonia académica, procediendo a firmar el acta en presencia del público asistente.

Tumbes, 29 de enero del 2026

Dr. Carlos Alberto Deza Navarrete DNI Nº 16532820 CODIGO ORCID 0000-0003-0592-1821 Presidente	**Mg. Víctor Manuel Saavedra Chávez** DNI Nº 02684070 CODIGO ORCID 0000-0002-570-4211 Secretario
Dr. Ramón García Seminario DNI Nº 03683231 CODIGO ORCID 0000-0003-0756-0935 Vocal	

C.C. - JURADOS (03) -ASESOR Y(CO)-INTERESADO-ARCHIVO (Decanato)
S. Acad.

RESUMEN DE INFORME DE ORIGINALIDAD

Erwin Saul Rosillo Urbina

INFORME FINAL DE TESIS_ESRU _C_II_Turnitin

Asesor de tesis de Arroz

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::3117:649410742

Fecha de entrega
4 nov 2026, 8:38 GMT-5

Fecha de descarga
4 nov 2026, 9:23 GMT-5

Nombre del archivo
INFORME FINAL DE TESIS_ESRU _C_II_Turnitin.docx

Tamaño del archivo
3.4 MB

63 páginas

14.536 palabras

79.182 caracteres



Dr. Ramon Garcia Seminario
Asesor
ORCID:0000-0003-0756-0935

turnitin Página 1 de 66 - Portada Identificador de la entrega trn:oid:::3117:649410742

9% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

1%	Fuentes de Internet
0%	Publicaciones
8%	Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



Dr. Ramon Garcia Seminario
Asesor
ORCID:0000-0003-0756-0935

Fuentes principales

1% Fuentes de Internet
0% Publicaciones
8% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional de Tumbes on 2025-12-29 8%

2 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional de Tumbes on 2025-09-22 <1%

3 Internet
repositorio.urp.edu.pe <1%

4 Trabajos del estudiante
Universitat Oberta de Catalunya on 2026-03-07 <1%

5 Trabajos del estudiante
Colegio de Postgraduados on 2026-07-02 <1%

6 Internet
www.coursehero.com <1%



Dr. Ramon Garcia Seminario
Asesor
ORCID:0000-0003-0756-0935

turnitin Página 3 de 66 - Descripción general de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:649410742

CERTIFICACIÓN

Dr. Ramón García Seminario, docente adscrito al Departamento Académico de Agronomía de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Tumbes,

CERTIFICA:

Que, la Tesis: *Bacillus velezensis* como bioinoculante para tolerancia a la salinidad en semillas y plántulas de *Oryza sativa* L. (Arroz.) Tumbes 2025, presentada por el Bach. Erwin Saul Rosillo Urbina, del Programa de Agronomía, ha sido asesorada y evaluada por mí persona, por lo que puede presentarse e inscribirse en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Tumbes para su revisión y aprobación.

Tumbes, octubre de 2026.



Dr. Ramón García Seminario

DNI: 03683231

Código ORCID: 0000-0003-0756-0935

Asesor de tesis

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Yo, Erwin Saul Rosillo Urbina, declaro que, el presente trabajo de investigación, titulado ***"Bacillus velezensis* como bioinoculante para tolerancia a la salinidad en semillas y plántulas de *Oryza sativa* L. (Arroz.) Tumbes 2025**" es original y ha sido presentado con el fin de obtener el título de Ingeniero Agrónomo. En tal sentido, confirmo que, los resultados que se han reportado no han sido copiados de otros archivos o investigaciones. Por ello, la información que no me pertenece, usada para complementar y discutir la tesis, está citada y referenciada debidamente por derechos del autor, siendo así, este estudio, producto del esfuerzo de mi persona y asesor, en cuanto a su ejecución y redacción para su aprobación.

Erwin Saul Rosillo Urbina

DEDICATORIA

A **Dios**, por ser mi guía constante, por concederme fortaleza en los momentos difíciles y la luz necesaria para no rendirme. Sin Su voluntad y bendición, nada de lo alcanzado habría sido posible.

A mis tesoros más grandes, **Saúl Erick Rosillo Alemán** y **Aitana Kathaleya Rosillo Alemán**, por ser la razón de mi lucha diaria y la fuerza que me impulsa a seguir adelante. Cada sacrificio y cada logro alcanzado llevan impreso su nombre. Esta tesis es el resultado de un camino recorrido con amor, con la firme convicción de dejarles un ejemplo de perseverancia, responsabilidad y esperanza. Todo lo que soy y todo lo que logre, siempre será por y para ustedes.

A la mujer que camina a mi lado y mi compañera de vida **Anny Gisel Alemán Mogollón**, por su amor, paciencia, comprensión y apoyo incondicional. Gracias por sostenerme en los momentos de cansancio. Este logro también es tuyo.

Y a mis queridos padres, **Héctor Saúl Rosillo Arcaya** y **María Cecilia Urbina Bolo**, por su ejemplo de trabajo honesto, sacrificio y amor incondicional. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo, la constancia y la humildad, y por creer en mí aun cuando dudé. Esta meta alcanzada también les pertenece.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento a **Dios**, por concederme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa tan importante de mi vida.

A mi asesor, **Dr. Ramón García Seminario**, por su valiosa orientación, paciencia y compromiso durante el desarrollo de esta investigación. Su guía académica y sus consejos fueron fundamentales para alcanzar los objetivos propuestos.

A mi co-asesor, **M.Sc. José Stalin Córdova Campos**, por su constante apoyo, sus acertadas sugerencias y su disposición para compartir sus conocimientos, los cuales contribuyeron significativamente al logro de este trabajo.

Al **M.Sc. Víctor Temoche Socola**, por su valioso apoyo durante este proceso. Gracias por brindarme la oportunidad de iniciar mi trayectoria en el campo de la investigación y crecimiento profesional. Su confianza y respaldo fueron fundamentales para continuar avanzando en mi desarrollo académico y personal.

Finalmente, a todas las personas que, directa o indirectamente, aportaron a la culminación de este trabajo, les expreso mi más profundo y sincero agradecimiento.

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD ix
DEDICATORIA x
AGRADECIMIENTOS xi
RESUMEN 19
ABSTRACT 20
CAPITULO I 21
INTRODUCCIÓN 21
CAPITULO II 23
REVISION DE LITERATURA 23
2.1. SALINIZACIÓN DE LOS SUELOS 23
2.2. IMPACTO DE LA SALINIDAD EN EL CULTIVO DE ARROZ 24
2.3. SEMILLA DE ARROZ: CARACTERÍSTICAS, ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN 27
2.4. EFECTOS DE LA SALINIDAD EN LA GERMINACIÓN Y ESTABLECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE ARROZ 30
2.5. BACTERIAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO VEGETAL Y SUS MECANISMOS. 31
2.6. BACTERIAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO VEGETAL EN LA AGRICULTURA 33
2.7. *BACILLUS VELEZENSIS* COMO PROMOTOR DEL CRECIMIENTO VEGETAL BAJO ESTRÉS SALINO 34
2.8. MECANISMOS DE *BACILLUS VELEZENSIS* EN LA MEJORA A LA TOLERANCIA DEL ESTRÉS SALINO. 35
CAPITULO III 38
MATERIALES Y METODOS 38
3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN 38
3.2. MATERIALES 38
3.2.1. MATERIAL BIOLÓGICO 38
3.2.2. MATERIALES 38
3.2.3. HERRAMIENTAS Y EQUIPOS 39
3.2.4. INSUMOS 39
3.3. TRATAMIENTOS 39

3.4. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN 40
3.4.1. Modelos estadísticos 41
3.4.2. Análisis de la varianza 43
3.4.3. Evaluación del cumplimiento de los supuestos de los residuos 43
3.4.4. Pruebas post-hoc 44
3.5. POBLACIÓN Y MUESTRA 44
3.6. CONDUCCIÓN DEL EXPERIMENTO 45
3.6.1. PREPARACIÓN DEL SUSTRATO 45
3.6.2. PREPARACIÓN DE RECIPIENTES 45
3.6.3. PREPARACIÓN DEL INOCULANTE BACTERIANO 46
3.6.4. PREPARACIÓN DE SOLUCIONES SALINAS 46
3.6.5. DESINFECCIÓN DE SEMILLAS 47
3.6.6. CONDICIONES DE GERMINACIÓN 47
3.6.7. INOCULACIÓN DE SEMILLAS 48
3.6.8. SIEMBRA 48
3.6.9. MANTENIMIENTO DE LA LÁMINA DE HUMEDAD 48
3.6.10. RECOLECCIÓN DE DATOS 49
3.6.11. ANÁLISIS DE DATOS 50
CAPITULO IV 51
RESULTADOS Y DISCUSIONES 51
4.1. ÍNDICES DE GERMINACIÓN DE SEMILLAS DE ARROZ (*ORYZA SATIVA* L.) 51
4.1.1. PORCENTAJE DE GERMINACIÓN - PGER (%) 51
4.1.2. VELOCIDAD MEDIA DE GERMINACIÓN - VMG (SEMILLAS GERMINADAS/DÍA) 54
4.1.3. TIEMPO MEDIO DE GERMINACIÓN - TMG (DÍAS) 57
4.1.4. COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD DE GERMINACIÓN - (CUG) 61
4.2. CRECIMIENTO Y VIGOR DURANTE LAS PRIMERAS ETAPAS DE DESARROLLO DEL ARROZ (*ORYZA SATIVA* L.) 64
4.2.1. ALTURA DE PLANTA - ALT (cm) 64
4.2.2. LONGITUD RADICULAR - LONGR (cm) 68
4.2.3. ÍNDICE DE VIGOR DE PLÁNTULAS (VIG) 71
4.3. ANÁLISIS DE SUPERVIVENCIA DE PLÁNTULAS DE ARROZ (*Oryza sativa* L.) 75

CAPITULO V 80
CONCLUSIONES 80
CAPITULO VI 81
RECOMENDACIONES 81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 83
ANEXOS 91
ANEXO 1. EVIDENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DEL POTENCIAL DE *BACILLUS VELEZENSIS* EN CONDICIONES DE SALINIDAD. 91
ANEXO 2. PARÁMETROS E ÍNDICES UTILIZADOS PARA CARACTERIZAR LA GERMINACIÓN Y EL DESARROLLO INICIAL DEL ARROZ. 93
ANEXO 3. DESCRIPCIÓN DE PROCEDIMIENTOS METODOLÓGICOS 94
ANEXO 4. EQUIVALENCIAS 99
ANEXO 5. REGISTROS EXPERIMENTALES 99
ANEXO 6. REGISTROS FOTOGRÁFICOS DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL 100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de Suelos salinos. 24
Tabla 2. Descripción de tratamientos. 40
Tabla 3. Tabla del Análisis de la varianza 43
Tabla 4. ANOVA para porcentaje de germinación - PGER (%)..... 52
Tabla 5. Comparación de medias del porcentaje de germinación – PGER (%) entre tratamientos, en función de la inoculación con Bacillus velezensis y concentración de NaCl. 53
Tabla 6. ANOVA para velocidad media de germinación - VMG (semillas germinadas / día) 56
Tabla 7. Comparación de medias de la velocidad media de germinación – VMG (semillas germinadas / día) entre tratamientos en función de la inoculación con Bacillus velezensis y concentración de NaCl. 56
Tabla 8. ANOVA para Tiempo medio de germinación - TMG (días) 59
Tabla 9. Comparación de medias del tiempo medio de germinación – TMG (días) entre tratamientos en función de la inoculación con Bacillus velezensis y concentración de NaCl. 60
Tabla 10. ANOVA para el Coeficiente de uniformidad de germinación (CUG)..... 63
Tabla 11. Comparación de medias del Coeficiente de uniformidad de germinación – CUG entre tratamientos en función de la inoculación con Bacillus velezensis y concentración de NaCl. 63
Tabla 12. ANOVA para la altura de plántula (ALT - cm) 66
Tabla 13. Comparación de medias de la altura de planta– ALT (cm) entre tratamientos en función de la inoculación con Bacillus velezensis y concentración de NaCl. 67
Tabla 14. Análisis de varianza para longitud radicular (LONGR - cm) 70
Tabla 15. Comparación de medias de la longitud radicular – LONGR (cm) entre tratamientos en función de la inoculación con Bacillus velezensis concentración de NaCl. 70
Tabla 16. Análisis de varianza para el índice de vigor de plántulas (VIG) 73

Tabla 17. Comparación de medias del índice de vigor entre tratamientos en función de la inoculación con Bacillus velezensis y concentración de NaCl. 74
Tabla 18. Mortalidad observada de plántulas de arroz bajo diferentes tratamientos de inoculación y salinidad. 79
Tabla 19. Resultados de la prueba de Log-Rank y Test de Cox para análisis de Supervivencia. 79
Tabla 20. Efectos de la inoculación de Bacillus velezensis en diversos cultivos bajo diferentes niveles de Salinidad. 91
Tabla 21. Matriz de descripción de variables a evaluarse 93
Tabla 22. Volumen total de soluciones salinas por cada tratamiento. 95
Tabla 23. Equivalencias prácticas para medir concentraciones de NaCl. 99
Tabla 24. Registros semanales de mediciones de Conductividad eléctrica en solución salina y saturación del sustrato de los tratamientos. 99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura y principales componentes de la semilla de arroz (Oryza sativa L.). 29
Figura 2. Distribución de los tratamientos y repeticiones en un DCA. 41
Figura 3. Comparación de las medias del porcentaje de germinación – PGER (%) 53
Figura 4. Comparación gráfica de las medias de la velocidad media de gterminacion – VMG (semillas germinadas / dia) 57
Figura 5. Comparación gráfica de las medias del tiempo medio de gterminacion – TMG (dias) 60
Figura 6. Comparación gráfica de las medias del Coeficiente de uniformidad de germinacion – CUG 64
Figura 7. Comparación gráfica de las medias de la altura de planta – ALT (cm) 67
Figura 8. Comparación gráfica de las medias de la longitud radicular – LONGR (cm) 71
Figura 9. Comparación gráfica de las medias del indice de vigor– VIG 74
Figura 10. Curvas de supervivencia de plántulas de arroz inoculadas y no inoculadas con Bacillus velezensis bajo diferentes concentración de NaCl. 78
Figura 11. Dimensiones del recipiente de Polipropileno. 94
Figura 12. Calculo del volumen de solución a usar 95
Figura 13. Horno de esterilización por calor seco, para esterilización de sustrato 100
Figura 14. Sustrato esterilizado y almacenado 100
Figura 15. Desinfeccion de semillas de arroz con hipoclorito de sodio al 2% durante 15 min. 101
Figura 16. Desinfeccion de semillas de arroz con alcohol al 70 % durante 30 min. 101
Figura 17. Secado de semillas de arroz posterior al proceso de desinfeccion .. 102
Figura 18. Ordenacion de recipientes para prueba de germinacion 102
Figura 19. Dosificacion de NaCl para preparacion de soluciones 103
Figura 20. Adicion de sustrato en los recipientes 103

Figura 21. Preparacion de la suspencion bacteriana..... 104
Figura 22. Dosificacion de la suspension bacteriana madre. 104
Figura 23. Inoculacion de semillas de arroz 105
Figura 24. Siembra en recipientes..... 105
Figura 25. Distribucion de semillas sobre la superficie del sustrato 106
Figura 26. Monitoreo de la conductividad electrica del medio 106
Figura 27. Evaluacion final 26 dias despues de la siembra..... 107

RESUMEN

La salinidad constituye un factor limitante para la germinación y el crecimiento inicial del arroz (*Oryza sativa* L.), especialmente en regiones costeras como Tumbes. El objetivo fue evaluar el efecto de la inoculación con *Bacillus velezensis* en semillas y plántulas sometidas a cinco niveles de salinidad (0, 5, 10, 15 y 20 dS/m). Se evaluaron el porcentaje, la velocidad, el tiempo medio y la uniformidad de germinación, la altura de plántula, la longitud radicular y el índice de vigor. Asimismo, se analizó la supervivencia mediante el método de Kaplan–Meier y pruebas de log-rank. Los resultados evidenciaron diferencias significativas entre tratamientos y una tendencia general de disminución de la germinación y el crecimiento conforme aumentó la salinidad. La inoculación no produjo diferencias significativas en los índices de germinación, la longitud radicular ni el índice de vigor dentro de cada nivel salino. Sin embargo, la altura de plántula fue significativamente mayor en los tratamientos inoculados a 0 dS/m (24.86 frente a 20.66 cm), 5 dS/m (22.02 frente a 19.63 cm) y 10 dS/m (18.25 frente a 15.30 cm), sin diferencias significativas a 15 y 20 dS/m. En el análisis de supervivencia, la inoculación se asoció con una mayor supervivencia a 15 y 20 dS/m, con diferencias significativas entre tratamientos; no se detectaron diferencias a 5 y 10 dS/m. En conjunto, la salinidad afectó negativamente la respuesta germinativa y el crecimiento inicial del arroz, mientras que la inoculación mostró respuestas favorables en la altura bajo salinidad baja e intermedia y en la supervivencia bajo salinidad elevada. Se concluye que B. velezensis presenta potencial como bioinoculante para favorecer determinados atributos del establecimiento temprano del arroz bajo estrés salino, aunque se requieren estudios adicionales para validar su eficacia en condiciones de campo.

palabras clave: *Bacillus velezensis*, Estrés salino, Arroz (*Oryza sativa*), Vigor de plántulas, Supervivencia.

ABSTRACT

Salinity is a limiting factor for rice (*Oryza sativa* L.) germination and early growth, particularly in coastal regions such as Tumbes, Peru. This study aimed to evaluate the effect of *Bacillus velezensis* inoculation on rice seeds and seedlings exposed to five salinity levels (0, 5, 10, 15, and 20 dS/m). Germination percentage, mean germination rate, mean germination time, germination uniformity coefficient, seedling height, root length, and seedling vigor index were evaluated. Seedling survival was also analyzed using the Kaplan–Meier method and log-rank tests. The results revealed significant differences among treatments and an overall decline in germination and growth as salinity increased. Inoculation did not produce significant differences in germination indices, root length, or seedling vigor within each salinity level. However, seedling height was significantly greater in inoculated treatments at 0 dS/m (24.86 vs. 20.66 cm), 5 dS/m (22.02 vs. 19.63 cm), and 10 dS/m (18.25 vs. 15.30 cm), whereas no significant differences were detected at 15 or 20 dS/m. Survival analysis showed that inoculation was associated with significantly higher survival at 15 and 20 dS/m, but no significant differences were found at 5 or 10 dS/m. Overall, salinity adversely affected rice germination and early growth, while inoculation showed favorable responses in seedling height under low and moderate salinity and in survival under high salinity. It is concluded that B. velezensis has potential as a bioinoculant to improve selected traits during early rice establishment under saline stress, although further studies are required to validate its effectiveness under field conditions.

Keywords: *Bacillus velezensis*, salinity stress, *Oryza sativa*, seedling vigor, survival.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

El arroz (*Oryza sativa* L.) es un cultivo de importancia para la seguridad alimentaria y la economía del Perú. Sin embargo, su crecimiento y productividad pueden verse afectados por factores ambientales adversos, particularmente la salinidad, originada por la acumulación excesiva de sales solubles en el suelo o el agua de riego (Riaz et al., 2019). Este estrés altera la absorción de agua y nutrientes y afecta procesos fisiológicos esenciales para el desarrollo vegetal (Fahad et al., 2019; Kumar et al., 2021), comprometiendo etapas críticas como la germinación, el crecimiento inicial y la supervivencia de las plántulas. Por ello, evaluar alternativas biológicas que contribuyan a mejorar la respuesta del arroz frente al estrés salino, como la inoculación con bacterias promotoras del crecimiento vegetal, representa una estrategia de interés para la investigación agrícola.

La germinación y el crecimiento inicial son etapas especialmente relevantes para el establecimiento del arroz. La exposición a concentraciones elevadas de sales puede dificultar la imbibición de las semillas, retrasar la germinación y reducir el porcentaje de semillas germinadas, comprometiendo la disponibilidad de plántulas para el establecimiento del cultivo (Uçarlı, 2020). Asimismo, la salinidad puede limitar el crecimiento de la parte aérea y del sistema radicular, mientras que su efecto sobre la supervivencia puede variar según la intensidad del estrés y la respuesta de las plantas. Por esta razón, evaluar conjuntamente los índices de germinación, las variables de crecimiento y la supervivencia permite caracterizar de manera más integral la respuesta temprana del arroz ante diferentes niveles de salinidad.

Frente a esta problemática, las bacterias promotoras del crecimiento vegetal, conocidas como PGPB por sus siglas en inglés, constituyen una alternativa de interés para investigar estrategias biológicas que contribuyan al desarrollo de los

cultivos bajo condiciones ambientales adversas (Mishra et al., 2021). Algunas de estas bacterias pueden asociarse con las plantas y favorecer su desarrollo mediante mecanismos descritos en la literatura, como la producción de compuestos reguladores del crecimiento, la modificación de las condiciones de la rizosfera y la participación en respuestas relacionadas con el estrés. Sin embargo, sus efectos dependen de la cepa bacteriana, la especie vegetal, las condiciones ambientales y el método de inoculación, por lo que es necesario evaluar su desempeño en condiciones experimentales específicas (Allouzi et al., 2022).

Dentro de este grupo, el género Bacillus ha despertado interés por su potencial para promover el crecimiento vegetal y favorecer la respuesta de las plantas frente a diferentes condiciones ambientales (Mahdi et al., 2022). En particular, *Bacillus velezensis* constituye una alternativa para estudiar su posible contribución a la respuesta del arroz frente al estrés salino. En la región de Tumbes, donde el cultivo de arroz tiene importancia agrícola, resulta pertinente generar evidencia experimental sobre el comportamiento de las plántulas frente a la salinidad y la posible contribución de inoculantes bacterianos. En el ámbito de esta investigación, se identifica la necesidad de evaluar la respuesta de la variedad estudiada a diferentes concentraciones salinas, tanto en semillas inoculadas con *B. velezensis* como en aquellas que no recibieron el inoculante. Esta evaluación permitirá aportar información específica para las condiciones controladas del ensayo.

En este contexto, el objetivo principal de la investigación fue evaluar el efecto de la inoculación con *Bacillus velezensis* sobre los índices de germinación, el crecimiento inicial y la supervivencia de plántulas de arroz (*Oryza sativa* L.) sometidas a diferentes concentraciones de salinidad. Para ello, se evaluó el comportamiento de semillas y plántulas inoculadas y no inoculadas bajo distintos niveles de conductividad eléctrica, considerando los indicadores de germinación, las variables de crecimiento y el tiempo de supervivencia. De esta manera, se buscó determinar la contribución de la inoculación al desarrollo temprano del arroz e identificar las condiciones de salinidad en las que se observaron respuestas más favorables.

CAPITULO II

REVISION DE LITERATURA

2.1. SALINIZACIÓN DE LOS SUELOS

La concentración de sales en el suelo es uno de los principales factores abióticos que limitan la producción agrícola a nivel mundial, ya que ocasiona reducciones significativas en la superficie cultivable, rendimientos y calidad de los cultivos (Shrivastava & Kumar, 2015). La salinidad hace referencia a la concentración de sales como; el Cloruro de sodio (NaCl), Cloruro de calcio ($CaCl_2$), Cloruro de magnesio ($MgCl_2$), Sulfato de sodio (Na_2SO_4), Sulfato de calcio ($CaSO_4.2H_2O$), Sulfato de magnesio ($MgSO_4$), etc. A menudo la salinidad del suelo se concentra en Na+ y Cl- (Stavi et al., 2021).

Existen dos tipos de salinización del suelo el primero conocido como salinización primaria y es cuando la sal almacenada en el suelo o en el agua subterránea se moviliza hacia la superficie en un proceso totalmente natural, el otro tipo de salinización es la salinización secundaria del suelo y es ocasionada netamente por la actividad antropogénica, este último tipo de salinización es la más preocupante ya que su proceso es mucho mayor y más rápida en comparación con la salinización primaria (Uri, 2018).

la Salinidad del suelo se cuantifica mediante la conductividad eléctrica (CE) del extracto de saturación del suelo y se generalmente se mide en decisiemens por metro (dS/m), a mayor CE, mayor concentración de sales y mayor estrés salino para las plantas.

Tabla 1.

Clasificación de Suelos salinos.

Nivel de salinidad (CEe, dS/m)	Clasificación
< 2 dS/m	Suelo *no salino*
2–4 dS/m	Ligeramente salino
4–8 dS/m	Moderadamente salino
8–12–16 dS/m	Muy salino / fuertemente salino
> 16 dS/m	Extremadamente salino

Fuente: Soil Salinity and Its Management (Yuvaraj et al., 2020)

Shrivastava & Kumar (2015), consideran un suelo salino como aquel que presenta una CE del extracto de saturación en la zona de la raíz superior a los 4 dS/m (aproximadamente 40 mM de NaCl a 25 ^{o}C), bajo estas condiciones la productividad de la mayoría de los cultivos se reduce significativamente.

2.2. IMPACTO DE LA SALINIDAD EN EL CULTIVO DE ARROZ

Liu et al. (2022), sugieren que el arroz presenta una mayor vulnerabilidad a la salinidad en comparación con otros cereales, principalmente en las etapas de germinación y reproductiva. Por su parte, Hussain et al. (2017), menciona que el arroz es un cultivo moderadamente sensible a la sal y su sensibilidad varia de una especie a otra y de las etapas de crecimiento. Además, destacan que la fase temprana de plántula es particularmente vulnerable al estrés salino. De acuerdo con C. Liu et al. (2022), la salinidad impacta en la fisiología y bioquímica de las plantas de arroz a lo largo de todas sus fases de desarrollo, que abarca, desde la germinación hasta la senescencia.

La salinidad puede tener varios efectos adversos en la fisiología de las plantas de arroz. Hussain et al. (2017), indican que las sales en el suelo pueden ocasionar estrés osmótico debido a la reducción del potencial hídrico lo que dificulta la captación de agua por las raíces de las plantas,

esto afecta negativamente la funcionalidad de las plantas para conservar un equilibrio hídrico adecuado. También provocan desequilibrio iónico en las plantas cuando los iones de sodio (Na+) y cloruro (Cl-) pueden acumularse en los tejidos vegetales, perturbando la homeostasis iónica, además, puede reducir la absorción y el transporte de otros nutrientes esenciales, como el potasio (K+), calcio (Ca2+), magnesio (Mg2+) y nitrato (NO3-). Finalmente indican que la salinidad ocasiona toxicidad iónica, iones de sodio (Na+) y cloruro (Cl-) pueden interferir con procesos metabólicos y provocar daños en las membranas celulares, disminuyendo la eficiencia fotosintética y perturbando el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Negrão et al. (2011), menciona al estrés oxidativo como consecuencia de que salinidad puede desencadenar la formación excesiva de especies reactivas de oxígeno (Reactive Oxygen Species - ROS) en las plantas las cuales pueden dañar las estructuras celulares y los componentes moleculares, como el ácido desoxirribonucleico (ADN), las proteínas y los lípidos. Además, mencionan que elevados niveles de sales en el suelo pueden dificultar el movimiento de los nutrientes esenciales desde el suelo hacia las raíces, lo que puede resultar en deficiencias nutricionales en las plantas. El estrés salino disminuye la cantidad de clorofila en las hojas, ya sea por su degradación o por la inhibición de su síntesis. Además, este estrés eleva la actividad de la clorofilasa (enzima que degrada la clorofila) (Pamuta et al., 2022).

Las consecuencias desfavorables de la salinidad en el cultivo de arroz desencadenan una serie de respuestas bioquímicas para contrarrestar las repercusiones del estrés salino. Kordrostami et al. (2017), en su investigación encontraron que las plantas de arroz pueden acumular solutos compatibles en sus tejidos, como aminoácidos prolinas y azúcares solubles para contrarrestar el estrés osmótico causado por la salinidad, estos solutos ayudan a mantener el equilibrio osmótico y estabilizan las proteínas y las membranas celulares. En respuesta al incremento de ROS las plantas activan su sistema de defensa antioxidante para contrarrestar el estrés oxidativo produciendo enzimas con actividad antioxidante, tales

como superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), peroxidasa (POD) y glutatión peroxidasa (GPX), así como metabolitos antioxidantes como el glutatión y los carotenoides (Pamuta et al., 2022).

La salinidad puede alterar la composición y la fluidez de las membranas de las células vegetales. Esto se debe a que los iones de sodio (Na+) y cloruro (Cl-) pueden reemplazar a otros iones esenciales en las membranas, lo que afecta su estructura y función. Como resultado, se pueden producir cambios en la capacidad de las membranas para ser permeables y en los procesos bioquímicos de los lípidos, lo que puede comprometer la integridad celular (Basu et al., 2010). Como lo indican Parvaiz A. & Satyawati S. (2008), la salinidad puede afectar el metabolismo de carbohidratos en las plantas de arroz lo que en consecuencia provoca una disminución en la fotosíntesis y una acumulación de azúcares solubles, como sacarosa y almidón, en diferentes órganos de la planta. Estos cambios pueden afectar el suministro de energía y los mecanismos de crecimiento y desarrollo de las plantas.

La salinidad generalmente modifica un gran número de procesos metabólicos bajo tales alteraciones, las células vegetales reducen el desarrollo de los brotes de las plantas. y elongación debido a la deshidratación. Estos cambios en el arroz resultan en el desarrollo de síntomas de lesión visual, en un marco de tiempo de semanas y meses (Riaz et al., 2019). Rodríguez et al. (2019) observaron que, al incrementar las concentraciones de NaCl en plántulas de arroz, tanto la longitud del tallo como la de la raíz se vieron significativamente afectadas. Como resultado, la tasa de crecimiento disminuyó considerablemente cuando la concentración de NaCl alcanzó los 200 mM. De manera similar Hussain et al. (2018) reportaron que, en las etapas iniciales del crecimiento, se observó una reducción significativa en la longitud de los brotes y la materia seca total de la planta, alcanzando disminuciones de hasta un 63 % y 85.2 %, respectivamente, cuando las plantas se cultivaron en condiciones salinas con 7.5 g de NaCl/kg de suelo seco. Además, la salinidad redujo

significativamente el número de macollos por planta y el área foliar durante la etapa de máximo macollamiento.

La salinidad también alterar los componentes del rendimiento. Souza-Lemes et al. (2016) determinaron que, bajo una concentración de 8 mM de NaCl se reduce la cantidad de panículas/planta, semillas/planta, peso de semillas/planta y peso de 1000 granos, además, esta concentración de sales contribuye a la formación de glumas estériles; las disminuciones en la productividad debido a la salinización pueden ser causadas por diversos factores, entre ellos, una disminución en la capacidad fotosintética inducida y una menor acumulación de nutrientes en los granos, lo que afectará negativamente la tasa de llenado debido a un aporte insuficiente de carbohidratos a la panícula. La salinidad puede alargar el ciclo de espigado. Por su parte, Aguilar Portero et al. (2016), observaron que el arroz sometido a estrés salino durante las fases vegetativa y reproductiva reduce significativamente el número de panículas/m^2 y el número de granos llenos/panícula.

2.3. SEMILLA DE ARROZ: CARACTERÍSTICAS, ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN

La semilla de arroz (*Oryza sativa* L.) es la unidad biológica que origina una nueva planta y corresponde botánicamente a un fruto tipo cariópside. Está protegida externamente por la lemma y la pálea, mientras que internamente comprende las cubiertas seminales, la capa de aleurona, el endospermo y el embrión, estructuras cuya organización influye en sus características físicas, nutricionales y fisiológicas. El endospermo constituye la principal reserva, mientras que el embrión dará origen a la nueva planta. En condiciones adecuadas de humedad, temperatura y oxígeno, la semilla pasa de un estado metabólicamente reducido a uno activo mediante la imbibición, movilización de reservas y crecimiento embrionario, iniciándose así la germinación (Li et al., 2022; Hazra et al., 2024).

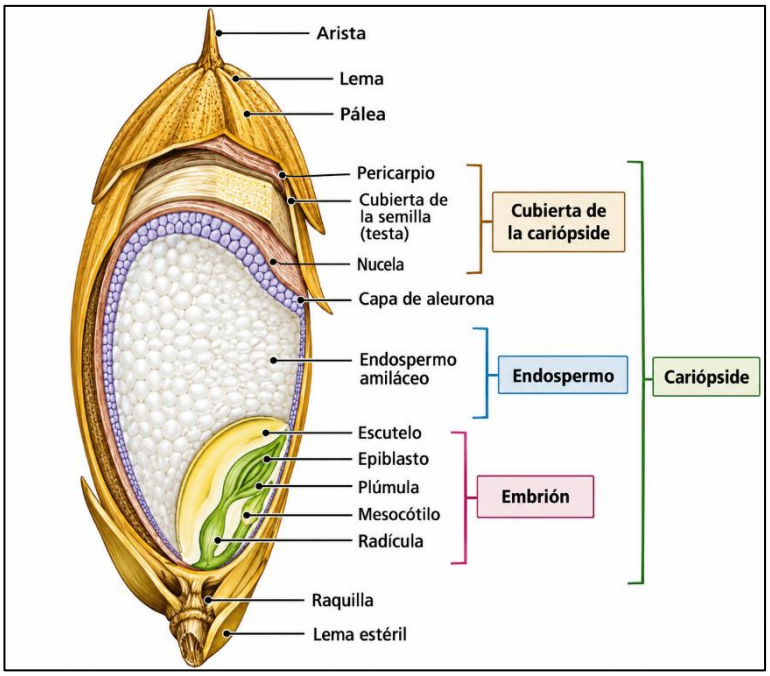
La semilla de arroz presenta una organización especializada que permite proteger el embrión y proporcionarle los recursos necesarios para su desarrollo inicial. Sus principales estructuras comprenden la cáscara, las cubiertas seminales, la capa de aleurona, el endospermo y el embrión, cada una con funciones específicas relacionadas con la protección, almacenamiento de reservas y germinación (Li et al., 2022). La cáscara, formada principalmente por la lemma y la pálea, constituye la cubierta externa y protege al grano frente a daños mecánicos y condiciones ambientales adversas (Li et al., 2022; Hazra et al., 2024).

Debajo de la cáscara se encuentran el pericarpio y las cubiertas seminales, que junto con la aleurona conforman parte de las capas externas del grano y cumplen funciones protectoras, además de concentrar proteínas, lípidos, minerales y diversos compuestos bioactivos. La capa de aleurona, ubicada alrededor del endospermo, es un tejido metabólicamente activo que participa en el almacenamiento y movilización de nutrientes durante la germinación. Por su parte, el endospermo constituye la mayor proporción de la semilla y representa la principal reserva de carbohidratos, especialmente almidón, además de proteínas, lípidos y minerales, proporcionando energía y nutrientes para el crecimiento inicial del embrión (Li et al., 2022; Hazra et al., 2024).

El embrión constituye la estructura a partir de la cual se desarrolla la nueva planta y, aunque representa una pequeña fracción de la semilla, presenta elevada actividad metabólica durante la germinación. Contiene las estructuras embrionarias que originarán el sistema radical y la parte aérea de la plántula, mientras que el escutelo establece una relación funcional con el endospermo y participa en la movilización y transferencia de nutrientes hacia el embrión. Durante las primeras etapas posteriores a la imbibición, estos tejidos experimentan cambios metabólicos y moleculares asociados con la reactivación del crecimiento y el establecimiento de la plántula (Yao et al., 2024).

Figura 1.

Estructura y principales componentes de la semilla de arroz (Oryza sativa L.).



Fuente: Elaboración propia, adaptada de Mohapatra & Sahu (2022) y An et al. (2020).

La semilla de arroz presenta una composición química determinada por la proporción de sus diferentes tejidos, siendo el almidón el principal componente de reserva del endospermo, constituido por amilosa y amilopectina. Además, contiene proteínas, lípidos, minerales, vitaminas y diversos compuestos bioactivos. Las proteínas cumplen funciones estructurales y de reserva, mientras que los lípidos participan como fuente energética y componentes de las membranas celulares. La concentración de estos componentes puede variar según el genotipo y las condiciones de cultivo (Li et al., 2022; Hazra et al., 2024).

Durante la imbibición, la semilla experimenta una rápida reactivación metabólica que permite la movilización de sus reservas. La degradación del almidón del endospermo genera azúcares que son utilizados en la respiración y glucólisis para proporcionar energía al embrión en crecimiento. Paralelamente, se activan procesos relacionados con el

metabolismo de carbohidratos, proteínas y lípidos, así como mecanismos de respuesta al estrés. La movilización eficiente de estas reservas resulta fundamental para el crecimiento del embrión, la emergencia de la radícula y el posterior establecimiento de la plántula (Hazra et al., 2024; Li et al., 2022).

2.4. EFECTOS DE LA SALINIDAD EN LA GERMINACIÓN Y ESTABLECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE ARROZ.

Según, Bewley et al. (2013) La germinación de una semilla de arroz se inicia con la imbibición que consiste en la absorción de agua por la semilla, lo que provoca su rehidratación y activación metabólica. Esta etapa es esencial para activar las enzimas como las α-amilasas y las proteasas, estas enzimas comienzan a descomponer las reservas de almidón y proteínas en la semilla para proporcionar los nutrientes necesarios para el crecimiento de la plántula.

Durante la germinación, la semilla de arroz experimenta un aumento en la tasa de respiración, para favorecer la generación de la energía requerida para iniciar el crecimiento y desarrollo inicial de la plántula (Nonogaki, 2014). A medida que la imbibición continúa, la radícula (primera raíz) emerge a través del pericarpio y la capa de aleurona de la semilla, esta ruptura del revestimiento de la semilla permite que la plántula salga y se exponga al medio ambiente (Bewley et al., 2013).

La salinidad puede tener varios efectos negativos sobre la germinación de las semillas y supervivencia de plántulas de arroz; de la Reguera et al. (2020), menciona al estrés osmótico y el estrés iónico como efectos negativos de las sales en la germinación de semillas; el primero puede causar una salida excesiva de agua de las células de la semilla, lo que resulta en una deshidratación y daño celular, la falta de agua dificulta la activación metabólica y los procesos de germinación; el segundo puede interferir con los procesos normales del movimiento de nutrientes y agua al

interior de la semilla, lo cual podría impactar de manera adversa la captación de nutrientes esenciales y la disponibilidad de agua necesaria para la germinación.

Uçarlı (2020), señala que la presencia de sales puede incrementar generación de moléculas reactivas de oxígeno (ROS, por su acrónimo en inglés) dentro de la semilla que pueden dañar los componentes celulares, como las proteínas, los lípidos y el material genético ADN. Este daño oxidativo puede inhibir la germinación al interferir con los procesos metabólicos y causar estrés celular. Además, las sales pueden alterar el equilibrio hormonal en la semilla de arroz. L. Liu et al. (2018), encontraron que la concentración de sales inhibe el proceso de germinación en las semillas de arroz al disminuir el contenido de giberelinas bioactivas como G1 y G4, esta disminución era causada por la expresión regulada al alza de genes inactivados con GA y la expresión de genes biosintéticos de GA, Además, la deficiencia de GA bioactiva inducida por NaCl inhibe la germinación de semillas de arroz al disminuir la actividad de α-amilasa a través de la disminución en la expresión del gen asociado a la α-amilasa.

2.5. BACTERIAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO VEGETAL Y SUS MECANISMOS.

Las Bacterias Promotoras del crecimiento vegetal o PGPB (Plant Growth-Promoting Bacteria) constituyen un conjunto de bacterias que colonizan el área del suelo circundante a las raíces de las plantas conocido como rizosfera y tienen la capacidad de establecer una relación sinérgica con las raíces de los cultivos los cuales proporcionan carbohidratos, ácidos orgánicos, vitaminas y minerales a través de los exudados de las raíces y a la vez, las PGPB ayudan al crecimiento de los cultivos a través de varios mecanismos directos e indirectos (Bind et al., 2023).

Los mecanismos directos están ligados a procesos que influyen directamente en el crecimiento de los cultivos y pueden ser; generación de

compuestos reguladores de crecimiento de las plantas, incluyendo auxinas, giberelinas, citoquininas, ácido salicílico y etileno, las cuales regulan el desarrollo de las raíces y promueve el desarrollo general de la planta (Orozco-Mosqueda et al., 2023). También destaca la solubilización de minerales en el suelo, un proceso que ocurre mediante la generación de compuestos orgánicos, ácidos, dióxido de carbono, iones hidroxilo, ácido sulfúrico y sustancias quelatantes, facilitando así la disponibilidad de nutrientes esenciales como fósforo, potasio, calcio y otros micronutrientes necesarios para los cultivos (Rehman Hakeem et al., 2020). Otro mecanismo importante es la fijación biológica del nitrógeno que consiste en la capacidad para convertir el nitrógeno atmosférico (N_2) en compuestos nitrogenados inorgánicos, como el amonio (NH_4^+) y el nitrato (NO_3^-), los cuales se incorporan al suelo y quedan accesibles para las plantas, esta capacidad es característica de las bacterias que pertenecen a los géneros *Rhizobium* y *Azospirillum* (Aasfar Abderrahim et al., 2021). Además, las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB) producen sideróforos, moléculas peptídicas que presentan cadenas laterales y grupos funcionales los cuales ofrecen ligandos con alta afinidad a la que pueden unirse los iones férricos (Fe_3^+) formando complejos quelatos de hierro que mejoran la disponibilidad de este nutriente para las plantas (Patel et al., 2023; Rehman Hakeem et al., 2020).

Los mecanismos indirectos están relacionados con la capacidad de los PGPB para disminuir los efectos nocivos de los patógenos y reducir el impacto de factores de estrés abiótico sobre el crecimiento y productividad de los cultivos, estos mecanismos incluyen; la producción de antibióticos, enzimas líticas y compuestos antifúngicos que inhiben el crecimiento de microorganismos patógenos en la rizosfera a este mecanismo se le conoce como biocontrol de patógenos (Compant et al., 2005). Algunas cepas de PGPB tienen la capacidad de activar las defensas naturales de la planta, haciéndola más resistente a futuras infecciones por patógenos actuando a manera de “vacuna” es decir provocan una Inducción de resistencia sistémica (ISR) (Ramamoorthy et al., 2001). Además, se tiene conocimiento que ciertas cepas de PGPB en condiciones de estrés, como la salinidad o

sequía, ayudan a la planta a producir una amplia gama de metabolitos secundarios, como los compuestos osmoprotectores, solutos compatibles, exopolisacaridos (EPS) y los compuestos orgánicos volátiles (VOC) que desempeñan un rol importante en la mejora de la tolerancia del estrés salino en los cultivos (Sunita et al., 2020).

2.6. BACTERIAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO VEGETAL EN LA AGRICULTURA

Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB) son ampliamente utilizadas en la agricultura como biofertilizantes. Estos microorganismos se caracterizan por poseer una o más cepas activas de bacterias, o una combinación de algas, hongos y otros microorganismos. Las PGPB emplean mecanismos directos o indirectos para mejorar la fertilidad de los suelos y promover el crecimiento de los cultivos, entre otros beneficios (Rehman Hakeem et al., 2020). Se ha demostrado que estas bacterias no solo proporcionan nutrientes a los cultivos, sino que también los protege contra las plagas y enfermedades. Además, incrementan la supervivencia de las plantas durante las primeras etapas de desarrollo y fortalecen la resistencia de las raíces (Daniel et al., 2022). Varias cepas de PGPB también pueden estimular la tolerancia al estrés abiótico en las plantas, un proceso conocido como cebado de la tolerancia sistémica inducida (IST). Entre los ejemplos de IST se incluyen Tolerancia al estrés por sal, sequia, calor y frio (Abd El-Daim et al., 2019).

Diversos estudios sugieren que cuando las PGPB se aplican a las semillas o directamente al suelo, en forma de inoculantes, pueden mejorar la tasa de germinación y el vigor de semillas, lo que favorece el rápido establecimiento de plántulas en campo definitivo. Por ejemplo, Pérez-García et al. (2023) evidenciaron que la inmersión de semillas de pepino (*Cucumis sativus* L.) en soluciones bacterianas de los géneros *Bacillus*, *Acinetobacter*, *Pseudomonas* y *Sinorhizobium* mejoraron significativamente el porcentaje de germinación, el índice de germinación,

el vigor, la longitud de la plúmula y radícula. Además, observaron un aumento en los compuestos fitoquímicos en las plántulas. De manera similar, Rahnama et al. (2023) comprobaron que la inoculación de semillas de *Secale montanum* con cepas de *Bacillus cereus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Azospirillum lipoferm* y *Azotobacter chroococum* mejoro significativamente los índices de vigor y calidad, incluso cuando las semillas fueron sometidas a periodos de estrés hidrico, en comparación con semillas que no fueron inoculadas.

Es por ello que el uso de las PGPB en la agricultura ha ganado relevancia debido a su potencial para ofrecer una alternativa ecológica y sostenible. Estas bacterias representan un aliado importante para minimizar el impacto ambiental de la agricultura tradicional, ya que contribuyen a disminuir la dependencia de fertilizantes y pesticidas químicos que pueden contaminar suelo y agua. Además, las PGPB favorecen a mejorar la sanidad de los cultivos y conservación de los suelos agrícolas a largo plazo (Daniel et al., 2022; Rehman Hakeem et al., 2020).

2.7. *BACILLUS VELEZENSIS* COMO PROMOTOR DEL CRECIMIENTO VEGETAL BAJO ESTRÉS SALINO

Bacillus velezensis es una bacteria Gram-positiva y formadora de esporas que posee propiedades antimicrobianas. Esta capacidad se debe a su habilidad para producir una diversidad de enzimas, como proteasas, celulasas y fitasas, lo que la hace ampliamente utilizada en el control de fitopatógenos. Una de sus características más destacadas es su capacidad para tolerar altas concentraciones de sales y su notable éxito de colonización de tejidos, lo que permite actuar como bacteria epifita y endofítica tanto en follaje como en raíces (Abd El-Daim et al., 2019; Su et al., 2024). Gracias a estas propiedades, *Bacillus velezensis* ha mostrado ser útil como PGPB, fortaleciendo la resistencia de los cultivos frente a condiciones de estrés salino. En Anexos – (***Tabla 19***). se presenta un resumen de estudios previos que evidencian cómo la inoculación de esta

bacteria contribuye al aumento de la tolerancia al estrés salino en diversos cultivos.

2.8. MECANISMOS DE *BACILLUS VELEZENSIS* EN LA MEJORA A LA TOLERANCIA DEL ESTRÉS SALINO.

Existen diversos mecanismos que usa *Bacillus velezensis* para aumentar la resistencia al estrés salino en diferentes cultivos dentro de los cuales se puede mencionar; la eliminación de especies reactivas de oxígeno (ROS) mediante la producción de enzimas antioxidantes. El estrés por sales puede provocar la producción de ROS en las plantas (O_2^-, OH^- y H_2O_2) las cuales reaccionan con las proteínas y lípidos provocando el estrés oxidativo (OS), para resistir el OS las plantas producen enzimas con propiedades antioxidantes, como el superóxido dismutasa (SOD) y peroxidasa (POD), estas enzimas mejoran la eliminación de ROS al catalizar su desnaturalización; por lo tanto la inoculación con *B. velezensis* puede incrementar significativamente la acción de las enzimas con capacidad antioxidantes dentro de la planta inoculadas (Bai et al., 2023; Masmoudi et al., 2021).

Además de las ROS que se producen durante el estrés salino también se produce el malondialdehido (MDA) el cual es un compuesto orgánico que se genera como consecuencia de la peroxidación lipídica, es decir, cuando los lípidos que forman la membrana celular son dañados por los radicales libres, por lo tanto, el contenido de MDA en los tejidos es uno de los marcadores más común del estrés por ROS y deterioro celular (Zhang et al., 2021). Además, es conocido que el malondialdeido puede poseer efectos mutagénicos y tóxicos para los organismos (Cordiano et al., 2023). En la investigación llevada a cabo por Bai et al. (2023), encontraron que la concentración de MDA en plantas de lechuga inoculadas con *B. velezensis* JB0319 fue significativamente menor en relación con el grupo control no tratado, por lo tanto, concluyeron que la inoculación con *B. velezensis* redujo en gran medida las alteraciones oxidativas de los lípidos en la membrana celular inducida por el estrés salino.

La inoculación con *B. velezensis* puede estimular la expresión de genes asociados con los mecanismos de defensa y adaptación, en el estudio realizado por Ali et al. (2022), se encontró que la inoculación con *B. velezensis* en plantas de arroz expuestas a condiciones de estrés por salinidad existe un incremento en la expresión de genes relacionados principalmente con la reacción frente a factores tanto de estrés biótico y abiótico, genes como; Oscyp89g1 y OserF104 involucrados en la modulación de señales hormonales como el Etileno, Acido abscísico y jasmonatos; Osdreb1f que participa en la activación de genes asociados con la tolerancia al estrés; el gen OSSAMDC2 responsable de codificar la enzima S-adenosilmetionina descarboxilasa, que es clave en la síntesis de poliamidas que contribuye a la estabilización de membranas. Otros estudios como el realizado por Zou et al. (2024), evidenciaron que la inoculación de *B. velezensis* en plantas de soja incremento la expresión de genes GmNHX y GmHKT relacionados con mantener el equilibrio osmótico a nivel celular al limitar la acumulación de Na^+ entre los tejidos de la planta, adema, otros genes como; el GmAPX, GmGSH, GmGR, GmGST, vinculados a la producción de enzimas y compuestos antioxidantes que defienden contra el daño provocado por las ROS generados durante el estrés salino.

Otro de los mecanismos, que ha sido muy documentado, es la síntesis de sideróforos y el ácido indol acético AIA; los sideróforos son compuestos de masa molecular reducida que poseen una alta afinidad por el hierro férrico (Fe^{+3}) y lo convierte en formas accesibles para los cultivos, además de proporcionar un suministro adecuado de hierro; por su parte el AIA es una fitohormona auxínica que ayuda en el desarrollo de raíces secundarias y tricomas radiculares, además de regular la expresión de genes involucrados en la síntesis de solutos compatibles que actúan como osmoprotectores, también se ve involucrada en la formación de enzimas antioxidantes y regula la actividad de transporte de iones como el H^+-ATPasa y canales iónicos que facilitan la exclusión de Na^+ en las células. Según lo informado por Masmoudi et al. (2021), algunos BPCV se ven

afectados por los niveles de sales lo que provoca que disminuya o se anule la producción de sideróforos y el AIA; sin embargo, en los resultados de su investigación demostraron que algunas cepas de *B. velezensis* mantienen esa capacidad de producir sideróforos, AIA y proteasa bajo una dosis de 680 mM de NaCl, planteando que la inoculación de *B. velezensis* puede ser eficaz para incrementar la resistencia de las plantas al estrés salino.

La formación de biopelículas es otro de los mecanismos registrados que usa *B. velezensis* para mejorar la resistencia frente al estrés por salinidad en los cultivos, las biopelículas son formaciones de comunidades bacterianas complejas, encapsuladas en una matriz extracelular compuestas principalmente por exopolisacaridos (EPS), proteínas, lípidos y ADN extracelular. Ayaz et al. (2022); informa que el expolisacarido formado *por B. velezensis* está compuesto principalmente por 54.6% de manosa y 45.3% de glucosa. Zou et al. (2024). aislaron los EPS de *B. velezensis* y posteriormente evaluaron sus efectos en plantas de soja expuestos a estrés por salinidad, los resultados mostraron que la incorporación de los EPS puede mantener el normal crecimiento de la longitud de brotes, peso seco de brotes, área foliar, longitud de raíces y peso seco de las raíces además mejoro la nodulación.

CAPITULO III

MATERIALES Y METODOS

3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN

La investigación se realizó en la Estación Experimental Agraria “Los Cedros” Instituto de Innovación Agraria – INIA, ubicado en Av. Panamericana km 12 – caserío los Cedros, distrito de corrales provincia y región de Tumbes, en las coordenadas 551963.8 E y 9600184.5 N, correspondientes al sistema de referencia espacial WGS 84 / UTM zona 17 S (EPSG: 32717).

3.2. MATERIALES

3.2.1. MATERIAL BIOLÓGICO

Semilla certificada de arroz variedad INIA 515 – CAPOTEÑA

Cepa de *Bacillus velezensis* proporcionadas por AGROBIOTEC SAC

3.2.2. MATERIALES

Tarrinas descartables de polipropileno 830 ml

Vasos de Precipitados 500 ml

Matraces 1000 ml

Placas Petri

Varilla de agitación

Tubos de cultivo

Papel aluminio

Film para embalaje

Cinta de embalaje
Galoneras de 2 litros
Bolsa ziploc
Bolsas de papel Kraft
Cinta Masking tape
Libreta
Lápiz
Marcador indeleble
Hojas bond A4
Regla

3.2.3. HERRAMIENTAS Y EQUIPOS

Vernier
Atomizador
Balanza
Estufa
Potenciómetro/conductímetro digital modelo EZ-9908
Cámara fotográfica
Computadora
GPS.

3.2.4. INSUMOS

Sal común (NaCl)
Agua destilada
Arena gruesa de rio

3.3. TRATAMIENTOS

En el presente experimento se evaluaron diez tratamientos, cuya descripción se presenta en la (***Tabla 2)***. Ocho tratamientos correspondieron a la evaluación de semillas de arroz (*Oryza sativa* L.) inoculadas y no inoculadas con *Bacillus velezensis* bajo cuatro niveles de salinidad inducida mediante soluciones de NaCl (5, 10, 15 y 20 dS/m). Asimismo, se

incluyeron dos tratamientos testigo sin adición de NaCl (0 dS/m): el testigo absoluto (T0a), sin inoculación bacteriana, y el testigo referencial (T0b), con inoculación de *B. velezensis*. Esta distribución permitió comparar el comportamiento de las semillas y plántulas entre los distintos tratamientos y evaluar las diferencias asociadas con la inoculación bacteriana en condiciones sin salinidad y bajo diferentes niveles de estrés salino.

Tabla 2.
Descripción de tratamientos.

Tratamiento	Clave
0 dS/m sin *Bacillus velezensis*	T0a
0 dS/m con *Bacillus velezensis*	T0b
5 dS/m sin *Bacillus velezensis*	T1
5 dS/m con *Bacillus velezensis*	T2
10 dS/m sin *Bacillus velezensis*	T3
10 dS/m con *Bacillus velezensis*	T4
15 dS/m sin *Bacillus velezensis*	T5
15 dS/m con *Bacillus velezensis*	T6
20 dS/m sin *Bacillus velezensis*	T7
20 dS/m con *Bacillus velezensis*	T8

Nota: T0a = Testigo Absoluto y T0b =Testigo Referencial

3.4. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

La investigación fue de tipo aplicada-experimental y cuantitativa, se aplicó el Método experimental para observar el efecto de la inoculación con *Bacillus velezensis* en semillas de arroz (*Oryza sativa* L.) expuestas a cinco niveles de solución con NaCl. Se dispuso de un total de 10 tratamientos con cuatro repeticiones, distribuidos en un diseño Completamente Aleatorizado (DCA). Se evaluaron los índices de germinación (porcentaje de germinación, Velocidad media de germinación, Tiempo medio de germinación y coeficiente de uniformidad) e índices de crecimiento (altura de plántula, longitud radicular e índice de vigor); además, se incluyó un análisis de supervivencia para evaluar la probabilidad de la supervivencia de las plántulas de arroz bajo los tratamientos estudiados. La unidad

experimental estuvo constituida por un recipiente de polipropileno con el sustrato y las soluciones de NaCl ensayadas. Durante el período de estudio, se registró la muerte de las plántulas como el evento de interés y los días a la ocurrencia de este, aquellas que no experimentaron el evento (sobrevivientes) al final del estudio fueron consideradas censuradas.

Figura 2.

Distribución de los tratamientos y repeticiones en un DCA.



3.4.1. Modelos estadísticos

Se aplicó el modelo estadístico general expresado en la siguiente ecuación:

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

Donde:

Y_{ij}: variable respuesta, donde se recogerán los resultados de la unidad experimental.
μ: parámetro que corresponde a la media general del modelo.
T_i: es el efecto del i-ésimo Tratamiento.
ε_{ij}: error aleatorio asociado con la observación.

Las curvas de supervivencia se estimaron mediante el método de Kaplan–Meier, descrita por la formula:

$$S(t) = \prod_{i:t \leq t} \left(1 - \frac{d_i}{n_i}\right)$$

Donde:

$S(t)$: es la estimación de la función de supervivencia en el tiempo *t*.
d_i: es el número de eventos en el tiempo t_i.
β_j: es el número de individuos en riesgo en el tiempo t_i.

Para evaluar la influencia de variables predictoras en la tasa de riesgo a lo largo del tiempo se usará el Modelo de Regresión de Cox, que se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$h(t) = h_0(t) \times \exp(\beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_p X_p)$$

Donde:

$h(t)$: es la función de riesgo instantáneo en el tiempo *t*.
$h_0(t)$: es la función de riesgo de base (o línea de base) en el tiempo *t* cuando todas las variables predictoras son cero.
$X_1, X_2, \ldots, X_p$: son las variables predictoras.
$\beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_p$: son los coeficientes de regresión que representan el cambio logarítmico en la tasa de riesgo asociada con un incremento de una unidad en la variable correspondiente.

3.4.2. Análisis de la varianza

Se realizó el análisis de la varianza (ANOVA) para determinar, si existe una diferencia significativa entre los tratamientos en términos de su efecto sobre la variable de respuesta.

Tabla 3.
Tabla del Análisis de la varianza

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	F
Tratamientos	SS_A	df_A	MS_A	F_A
Error	SS_{Error}	df_{Error}	MS_{Error}	
Total	SS_{Total}	df_{Total}		

Nota: SS = Suma de cuadrados, df = Grados de libertad, MS = Cuadrados medios, F = Valor F

3.4.3. Evaluación del cumplimiento de los supuestos de los residuos

Para comprobar que el modelo era el adecuado para los datos se verificaron los supuestos de los residuos del modelo con los test respectivos;

a) **Supuesto de normalidad:** se usó el test de Shapiro-Wilk por ser el más adecuado para muestras pequeñas (menos de 50 observaciones). (Shapiro & Wilk, 1965)

b) **Supuesto de independencia:** Se uso el test de Durbin-Watson para verificar si los residuos del modelo estaban autocorrelacionados. (Durbin & Watson, 1950)

c) **Supuesto de homocedasticidad:** Se uso el test de Bartllet para verificar que la varianza de los errores era constante en todas las observaciones.(Bartlett, 1937)

3.4.4. Pruebas post-hoc

Con el objetivo de identificar las diferencias significativas entre los grupos, se aplicará la prueba de Tukey al 95 % de confiabilidad como prueba post-hoc. La que proporcionará información detallada sobre las diferencias específicas entre los tratamientos con la finalidad de explorar las diferencias entre los grupos cuando al menos un valor F del ANOVA fuese significativo.

3.5. POBLACIÓN Y MUESTRA

La población de estudio estuvo constituida por dos grupos de semillas de arroz (*Oryza sativa* L.), un grupo fueron inoculadas con *Bacillus velezensis* y otras constituyeron el testigo, ambos grupos fueron sometidos a distintos niveles de NaCl. La unidad experimental estuvo constituida por 1 recipiente de polipropileno, en las cuales se sembraron 26 semillas. Cada tratamiento contó con cuatro unidades experimentales (repeticiones), haciendo un total de 40 unidades experimentales, lo que representó un total de 1 040 semillas (26 semillas × 4 repeticiones × 10 tratamientos).

En la evaluación de la germinación, se consideró la totalidad de las semillas sembradas. El registro de datos se realizó de manera diaria durante un período de 8 días, que presentó protrusión visible de la radícula a través de las estructuras que la recubren, siguiendo el criterio morfológico empleado en estudios de germinación de arroz (Li et al., 2017; Ding et al., 2024). Para el análisis del crecimiento de las plantas (10 días), Para la evaluación de las variables de crecimiento, se seleccionaron al azar hasta seis plántulas entre las emergidas en cada tarrina, las cuales constituyeron submuestras de la unidad experimental. En estas plantas se realizaron las mediciones correspondientes y, posteriormente, se calculó el promedio de cada variable por tarrina, obteniéndose un único valor por unidad experimental para el análisis estadístico. En aquellos casos en los que el número de

plántulas emergidas fue inferior a seis, se evaluaron las plantas disponibles. Por otra parte, para el análisis de supervivencia se incluyeron todas las plántulas emergidas en cada unidad experimental, efectuándose un seguimiento individual hasta la ocurrencia de la mortalidad o hasta el final del período de evaluación (26 días). Las plántulas que permanecieron vivas al finalizar el seguimiento se consideraron observaciones censuradas.

3.6. CONDUCCIÓN DEL EXPERIMENTO

3.6.1. PREPARACIÓN DEL SUSTRATO

Como sustrato se utilizó arena gruesa de río, la cual fue lavada con agua potable para eliminar impurezas y partículas finas. Posteriormente, la arena se sometió a un tratamiento térmico en un horno de esterilización por calor seco a 180 °C durante 2 horas. Una vez finalizado el tratamiento, se dejó enfriar y se colocó en bolsas de polietileno de 8 µm de espesor, debidamente rotuladas y cerradas, para reducir el riesgo de contaminación antes de su utilización en el experimento.

3.6.2. PREPARACIÓN DE RECIPIENTES

Para el experimento se utilizaron tarrinas de Polipropileno descartables con las dimensiones; diámetro mayor 11,5 cm, diámetro menor 9 cm y una altura de 10 cm (830 ml de volumen), los cuales se les lleno hasta los ¾ de su volumen total el sustrato esterilizado. posteriormente, se adicionaron las soluciones de NaCl, según los tratamientos en estudio.

3.6.3. PREPARACIÓN DEL INOCULANTE BACTERIANO

El inoculante bacteriano fue proporcionado por la empresa Agriobiotec S.A.C. en un frasco de 500 ml, cuya etiqueta consignaba la identificación de *Bacillus velezensis* y una concentración declarada de 1×10^{11} UFC/ml. La muestra se almacenó bajo refrigeración hasta su utilización. Para el ensayo, se estableció una concentración de trabajo teórica de 1 × 108 UFC/ml mediante dilución del producto original. Anexo 3. No se dispuso de un código de cepa ni de documentación complementaria de caracterización microbiológica proporcionada por el proveedor.

3.6.4. PREPARACIÓN DE SOLUCIONES SALINAS

Las soluciones de NaCl se prepararon con agua destilada y las cantidades de NaCl (g) necesarias para alcanzar la conductividad eléctrica de los tratamientos ensayados, para ello, se usó la relación reportada por (Moliner Aramendia & Masaguer Rodríguez, 1996):

$$\mathrm{NaCl(\,g/l)} = \mathrm{CE\ (\,dS/m)} \times 0.64$$

Donde;

$\mathrm{NaCl\ (g/l)} = \text{Cantidad de Sal en gramos por litro}$

$\mathrm{CE\ (dS/m)} = \text{Conductividad Electrica en decisiemens por metro}$

$0.64 = \text{Factor de conversion}$

El volumen de la solución salina aplicado a los recipientes que contenían el sustrato, se determinó teniendo en cuenta la capacidad de campo (CC).

Una vez preparadas, las soluciones salinas se midieron con un conductivímetro portátil digital para verificar que sus valores de CE correspondieran a los niveles establecidos para cada tratamiento.

Posteriormente, las soluciones se aplicaron a las bandejas que contenían el sustrato de arena de río previamente esterilizada, considerando su capacidad de campo (CC) para determinar el volumen de aplicación.

Después de la incorporación de las soluciones al sustrato, se realizaron mediciones adicionales de CE con el conductivímetro para observar las variaciones asociadas al contacto entre la solución salina y el sustrato. Se registraron incrementos ligeros respecto a los valores objetivo; por ejemplo, en el tratamiento de 5 dS/m se observó un valor aproximado de 5,4 dS/m después de la aplicación. Durante el ensayo, se efectuó un seguimiento periódico de la CE, prestando especial atención a las variaciones observadas durante la reposición de agua destilada. Esta última se utilizó para reponer el agua perdida y mantener las condiciones de humedad del sustrato.

3.6.5. DESINFECCIÓN DE SEMILLAS

La superficie de las semillas de arroz fue lavada con agua destilada tres veces y luego sumergidas completamente en una solución con hipoclorito de sodio al 2 % durante 15 min. posteriormente fueron tratadas con alcohol al 70 % durante 30 min. (Kumar, et al., 2021), seguido con enjuagues de agua destilada en un tamiz para eliminar residuos de la solución desinfectante, finalmente las semillas se colocaron en papel toalla para el respectivo secado.

3.6.6. CONDICIONES DE GERMINACIÓN

Los recipientes se mantuvieron a temperatura ambiente (28 – 30°C) y no expuestas a luz directa del sol, dentro del laboratorio de Recursos genéticos de la estación experimental agraria “Los Cedros – INIA”, durante la germinación los recipientes fueron cubiertos con plástico transparente para mantener las condiciones de humedad del sustrato y facilitar la germinación de las semillas.

3.6.7. INOCULACIÓN DE SEMILLAS

Las semillas de arroz, previamente desinfectadas, se sumergieron en una suspensión bacteriana de *Bacillus velezensis* a una concentración de 1×10^8 UFC/mL durante 30 minutos, con la finalidad de favorecer la adhesión de las bacterias a la superficie seminal. Por su parte, las semillas correspondientes a los tratamientos sin inoculación bacteriana se sometieron a una inmersión en agua estéril durante el mismo período, como procedimiento de control. Finalizado el tratamiento, las semillas se retiraron de sus respectivas soluciones y se utilizaron para la siembra.

3.6.8. SIEMBRA

La siembra de las semillas de arroz se realizó en tarrinas o recipientes de polipropileno que contenían el sustrato correspondiente. Previo a la siembra, se adicionaron las soluciones salinas al sustrato hasta alcanzar una lámina aproximada de 2 mm, con el fin de proporcionar las condiciones de humedad necesarias para la germinación. Posteriormente, se distribuyeron 26 semillas por recipiente, esparciéndolas uniformemente sobre la superficie del sustrato.

3.6.9. MANTENIMIENTO DE LA LÁMINA DE HUMEDAD

Durante el periodo de germinación, la lámina de humedad del sustrato fue revisada diariamente. En aquellos recipientes en los que se observó ausencia o disminución de la lámina establecida, se adicionó agua destilada estéril hasta restituir una lámina aproximada de 2 mm. El uso de agua destilada tuvo como finalidad mantener las condiciones de humedad necesarias para la germinación sin modificar las concentraciones de sales correspondientes a cada tratamiento.

3.6.10. RECOLECCIÓN DE DATOS

Los datos de las variables evaluadas se registraron en fichas de evaluación durante el desarrollo del experimento. Los parámetros de germinación se registraron cada 24 horas durante ocho días, mientras que las variables de crecimiento se evaluaron a los 10 días después de la siembra. El ensayo estuvo conformado por cuatro recipientes por tratamiento, considerados como unidades experimentales. Para las variables de crecimiento, las plántulas evaluadas dentro de cada recipiente se consideraron submuestras y sus datos se resumieron para obtener un valor representativo por unidad experimental.

Para el análisis de supervivencia, cada plántula se registró individualmente y el tiempo de seguimiento se contabilizó desde el día de la siembra, establecido como tiempo cero para todas las plántulas, independientemente del día en que germinaron. Por tanto, las plántulas que germinaron en días diferentes ingresaron al registro con el mismo origen temporal. El seguimiento se extendió hasta el día 26. La muerte de cada plántula se consideró el evento de interés y se registró el día en que ocurrió. Las plántulas que permanecieron vivas al finalizar el ensayo se consideraron observaciones censuradas a la derecha, con un tiempo de censura de 26 días.

Las curvas de supervivencia se estimaron mediante el método de Kaplan–Meier y se compararon con la prueba de Log-rank. Asimismo, se ajustaron modelos de riesgos proporcionales de Cox y se evaluó el supuesto de proporcionalidad mediante los residuos de Schoenfeld. Debido a que las plántulas estaban agrupadas en recipientes que constituían las unidades experimentales, se reconoce la posible dependencia entre las observaciones de un mismo recipiente. Los análisis realizados no incorporaron un ajuste específico para esta dependencia, aspecto que debe considerarse al interpretar los resultados.

3.6.11. ANÁLISIS DE DATOS

Los datos obtenidos fueron procesados y sistematizados a través de la hoja de cálculo del Programa Microsoft Excel 2021 (LTSC) Versión: 2108, donde se calcularon los índices de germinación y vigor (***Tabla 20.***); Para la realización de los análisis estadísticos, descritos en Modelos estadísticos, se usaron los Programas R versión 4.5.0 y Rstudio versión 2025.5.0.496, incluyendo los paquetes, agricolae (v. 1.3.7), survival (v. 3.8.3), survminer (v. 0.5.1), ggplot2 (v. 3.5.2)

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. ÍNDICES DE GERMINACIÓN DE SEMILLAS DE ARROZ (*ORYZA SATIVA* L.)

4.1.1. PORCENTAJE DE GERMINACIÓN - PGER (%)

El análisis de varianza detectó diferencias significativas en el porcentaje de germinación (PGER) entre los diez tratamientos evaluados ($F = 5.214$; $p < 0.001$; $CV = 11.27$ %). En ausencia de salinidad, el mayor porcentaje se registró en T0a (sin inoculación), con 87.50 %, seguido de T0b (inoculado), con 82.69 %. A 5 dS/m, los valores fueron de 73.08 % en T1 (sin inoculación) y 70.19 % en T2 (inoculado), mientras que a 10 dS/m alcanzaron 77.89 % en T3 y 72.12 % en T4, respectivamente. A 15 dS/m, el PGER disminuyó a 64.42 % en T5 y 62.50 % en T6. Finalmente, a 20 dS/m se registraron los menores valores, con 62.50 % en T7 y 60.58 % en T8.

La prueba de comparación múltiple de Tukey ($\alpha = 0.05$) mostró que T0a perteneció al grupo “a”, mientras que T7 y T8 se ubicaron en el grupo “c”. Sin embargo, algunos tratamientos de salinidad intermedia compartieron letras con los grupos de mayor y menor germinación, por lo que no todas las diferencias numéricas entre concentraciones fueron estadísticamente significativas. En términos generales, se observó una tendencia a la disminución del PGER conforme aumentó

la salinidad, particularmente a partir de 15 dS/m. Este comportamiento coincide con lo reportado por Farooq et al. (2021), quienes describieron una reducción de la germinación del arroz bajo concentraciones crecientes de NaCl. Una explicación posible es que el estrés salino dificulta la absorción de agua durante la imbibición y puede alterar procesos metabólicos necesarios para la germinación (De la Reguera et al., 2020; Uçarlı, 2020).

Respecto a la inoculación con *Bacillus velezensis*, los tratamientos inoculados presentaron valores numéricamente inferiores a sus respectivos controles sin inoculación en los cinco niveles evaluados. La diferencia fue de 4.81 puntos porcentuales a 0 dS/m, 2.89 a 5 dS/m, 5.77 a 10 dS/m, 1.92 a 15 dS/m y 1.92 a 20 dS/m. Sin embargo, en cada nivel de salinidad, los tratamientos inoculados y no inoculados compartieron al menos una letra en la prueba de Tukey, por lo que no se detectaron diferencias estadísticamente significativas atribuibles a la inoculación. En consecuencia, aunque las medias mostraron una tendencia numérica desfavorable para los tratamientos inoculados, no existe evidencia estadística suficiente para concluir que *B. velezensis* redujo el porcentaje de germinación.

Tabla 4.
ANOVA para porcentaje de germinación - PGER (%)

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F value	Pr(>F)	significancia
Tratamientos	9	3032	336.8	5.214	0.000274	***
Residuos	30	1938	64.6			

CV = 11.27 %

Tabla 5.

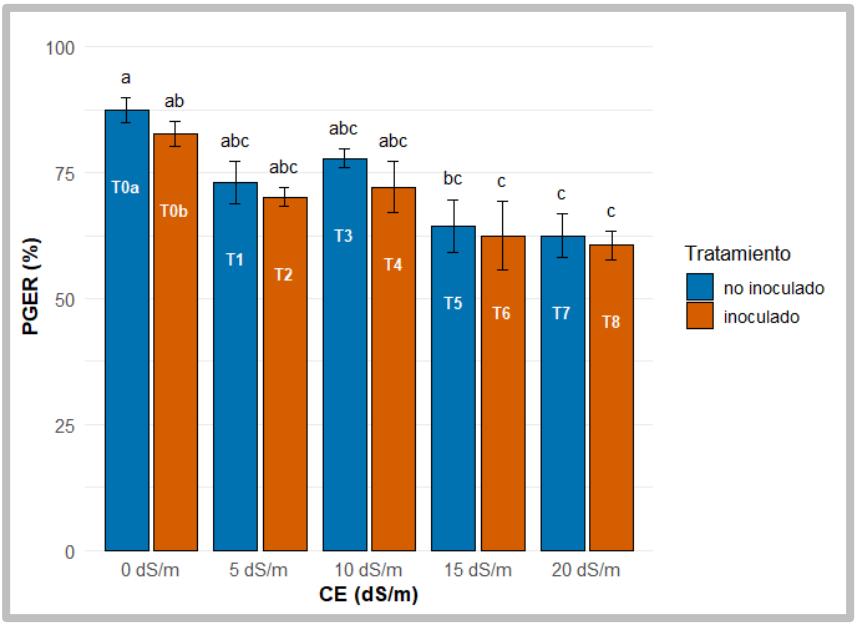
Comparación de medias del porcentaje de germinación – PGER (%) entre tratamientos, en función de la inoculación con Bacillus velezensis y concentración de NaCl.

Tratamiento		Concentración NaCl (dS/m)	PGER (%)	Error estándar	Grupos*
T0a	no inoculado	0	87.50	2.42	**a**
T0b	inoculado	0	82.69	2.48	**ab**
T1	no inoculado	5	73.08	4.16	**abc**
T2	inoculado	5	70.19	1.84	**abc**
T3	no inoculado	10	77.89	1.84	**abc**
T4	inoculado	10	72.12	5.06	**abc**
T5	no inoculado	15	64.42	5.29	**bc**
T6	inoculado	15	62.50	6.73	**c**
T7	no inoculado	20	62.50	4.26	**c**
T8	inoculado	20	60.58	2.88	**c**

* Resultados de la prueba de comparación múltiple HSD de Tukey (α = 0.05)

Figura 3.

Comparación de las medias del porcentaje de germinación – PGER (%)



4.1.2. VELOCIDAD MEDIA DE GERMINACIÓN - VMG (SEMILLAS GERMINADAS/DÍA)

El análisis de varianza evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para la velocidad media de germinación (VMG) ($F = 39.07$; $p = p < 0.001$), con un coeficiente de variación de 11.69 %. La mayor velocidad se registró en el tratamiento sin salinidad y sin inoculación (T0a), con 9.75 semillas germinadas por día, seguido del tratamiento inoculado sin salinidad (T0b), con 9.12 semillas/día; ambos conformaron el grupo “a” de Tukey. A medida que aumentó la salinidad, la VMG mostró una tendencia descendente. A 5 dS/m, los valores fueron de 7.02 y 6.82 semillas/día para los tratamientos sin inoculación (T1) y con inoculación (T2), respectivamente. A 10 dS/m, se registraron 7.04 semillas/día en T3 y 6.15 en T4. En las concentraciones de 15 dS/m, los valores fueron de 4.40 y 4.44 semillas/día para T5 y T6, mientras que a 20 dS/m disminuyeron a 3.34 y 3.37 semillas/día en T7 y T8, respectivamente. Estos resultados muestran que las concentraciones salinas más elevadas estuvieron asociadas con una menor velocidad de germinación.

La tendencia observada concuerda con Hussain et al. (2022), quienes evaluaron diez cultivares de arroz sometidos a concentraciones crecientes de NaCl y encontraron una reducción significativa de la velocidad de germinación, especialmente en los niveles de salinidad más elevados. Este comportamiento puede relacionarse con las dificultades que experimentan las semillas para absorber agua y activar oportunamente los procesos metabólicos necesarios para la germinación bajo estrés salino. No obstante, en el presente estudio, la prueba de Tukey mostró que no todas las concentraciones de salinidad se diferenciaron estadísticamente entre sí; por tanto, la tendencia descendente debe interpretarse considerando los grupos de comparación obtenidos.

Respecto a la inoculación con *Bacillus velezensis*, los valores de VMG fueron numéricamente inferiores a los del control sin inocular en las concentraciones de 0, 5 y 10 dS/m, mientras que a 15 y 20 dS/m fueron prácticamente iguales. Sin embargo, los tratamientos inoculados y sus respectivos controles compartieron al menos una letra en la prueba de Tukey en todos los niveles de salinidad, lo que indica que las diferencias no fueron estadísticamente significativas. En consecuencia, no se encontró evidencia suficiente para afirmar que la inoculación aumentó o redujo la velocidad media de germinación.

Esta respuesta contrasta con investigaciones en las que determinados aislados bacterianos promotores del crecimiento mejoraron la germinación del arroz bajo condiciones salinas. Por ejemplo, Gupta et al. (2023) reportaron respuestas favorables con cepas bacterianas específicas, entre ellas *Bacillus safensis*, aunque no evaluaron la misma especie bacteriana utilizada en este ensayo. Por ello, sus resultados constituyen un antecedente comparativo, pero no permiten anticipar una respuesta equivalente de *B. velezensis*. En conjunto, los resultados indican que, bajo las condiciones experimentales evaluadas, la salinidad estuvo asociada con una disminución de la VMG, mientras que la inoculación no produjo un efecto estadísticamente detectable sobre este indicador.

Tabla 6.

ANOVA para velocidad media de germinación - VMG (semillas germinadas / día)

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F value	Pr(>F)	significancia
Tratamientos	9	181.32	20.147	39.07	3.77 e-14	***
Residuos	30	15.47	0.516			

CV = 11.69 %

Tabla 7.

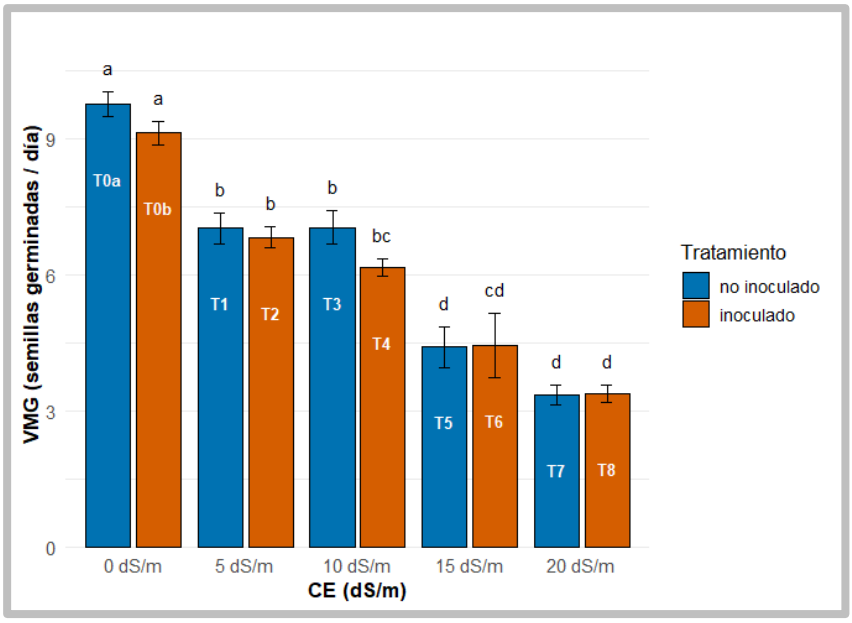
Comparación de medias de la velocidad media de germinación – VMG (semillas germinadas / día) entre tratamientos en función de la inoculación con Bacillus velezensis y concentración de NaCl.

Tratamiento		Concentración NaCl (dS/m)	VMG (semillas germinadas / día)	Error estándar	grupos
T0a	no inoculado	0	9.75	0.28	**a**
T0b	inoculado	0	9.12	0.26	**a**
T1	no inoculado	5	7.02	0.34	**b**
T2	inoculado	5	6.82	0.23	**b**
T3	no inoculado	10	7.04	0.38	**b**
T4	inoculado	10	6.15	0.19	**bc**
T5	no inoculado	15	4.40	0.44	**d**
T6	inoculado	15	4.44	0.72	**cd**
T7	no inoculado	20	3.34	0.22	**d**
T8	inoculado	20	3.37	0.19	**d**

* Resultados de la prueba de comparación múltiple HSD de Tukey (α = 0.05)

Figura 4.

Comparación gráfica de las medias de la velocidad media de gterminacion – VMG (semillas germinadas / dia)



4.1.3. TIEMPO MEDIO DE GERMINACIÓN - TMG (DÍAS)

El análisis de varianza evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para el tiempo medio de germinación (TMG) ($F = 70.01$; $p < 0.001$), con un coeficiente de variación de 6.32 %. El menor TMG se registró en el tratamiento sin salinidad y sin inoculación (T0a), con 2.53 días, seguido del tratamiento inoculado sin salinidad (T0b), con 2.57 días. A medida que aumentó la salinidad, el tiempo medio de germinación presentó una tendencia creciente. A 5 dS/m, los valores fueron de 3.00 días en el tratamiento sin inoculación (T1) y 2.97 días en el inoculado (T2). A 10 dS/m, el TMG alcanzó 3.20 días en T3 y 3.32 días en T4. En los tratamientos sometidos a 15 dS/m, los valores aumentaron a 4.19 y 4.08 días para T5 y T6, respectivamente; mientras que, a 20 dS/m, se registraron los mayores tiempos de germinación, con 5.14 días en T7 y 5.02 días en T8. La prueba de Tukey agrupó los tratamientos de 20 dS/m en el grupo “a” y los tratamientos sin

salinidad en el grupo “d”, lo que evidencia diferencias entre los extremos de salinidad evaluados. Los tratamientos intermedios presentaron grupos compartidos, por lo que no todas las concentraciones se diferenciaron estadísticamente entre sí.

El TMG se incrementó a medida que aumentó la conductividad eléctrica, lo cual indica que, las condiciones salinas retrasaron la germinación de las semillas de arroz. Este resultado concuerda con Desheva et al. (2022), quienes encontraron que el aumento de las concentraciones de NaCl prolongó el tiempo medio de germinación en variedades de arroz. Asimismo, estudios sobre la respuesta de genotipos de arroz al estrés salino han identificado el TMG como un indicador útil para reconocer respuestas de germinación menos favorables bajo salinidad. Fisiológicamente, este retraso puede relacionarse con la disminución del potencial osmótico del medio, que dificulta la absorción de agua por la semilla y puede ralentizar la activación de los procesos metabólicos requeridos para la germinación.

En cuanto a la inoculación con *Bacillus velezensis*, las diferencias entre los tratamientos inoculados y sus respectivos controles fueron pequeñas y no alcanzaron significación estadística en ninguno de los niveles de salinidad, debido a que cada par compartió letras en la prueba de Tukey. A 0 dS/m, el TMG fue de 2.57 días en las semillas inoculadas, frente a 2.53 días en las no inoculadas. A 5 dS/m, la inoculación presentó un valor ligeramente menor, de 2.97 frente a 3.00 días; a 10 dS/m, el TMG fue ligeramente mayor en el tratamiento inoculado, con 3.32 frente a 3.20 días. En cambio, a 15 y 20 dS/m, los tratamientos inoculados mostraron tiempos numéricamente inferiores a sus controles, con diferencias de 0.11 y 0.12 días, respectivamente. No obstante, estas variaciones no permiten atribuir a la inoculación un efecto estadísticamente comprobado sobre el tiempo de germinación.

Aunque se ha descrito que determinadas bacterias promotoras del crecimiento vegetal pueden mejorar algunos indicadores de germinación del arroz bajo estrés salino, estos efectos dependen de las cepas y de las condiciones experimentales; por ejemplo, Gupta et al. (2023) estudiaron aislados bacterianos diferentes de B. velezensis. En el presente ensayo, por tanto, no se encontró evidencia estadística suficiente para concluir que la inoculación aceleró o retrasó la germinación. En conjunto, el TMG estuvo principalmente asociado con el nivel de salinidad: las concentraciones más elevadas se relacionaron con una germinación más tardía, mientras que la inoculación no modificó significativamente este indicador.

Tabla 8.

ANOVA para Tiempo medio de germinación - TMG (días)

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F value	Pr(>F)	significancia
Tratamientos	9	32.64	3.627	70.01	<2e-16	***
Residuos	30	1.55	0.052			

CV = 6.32 %

Tabla 9.

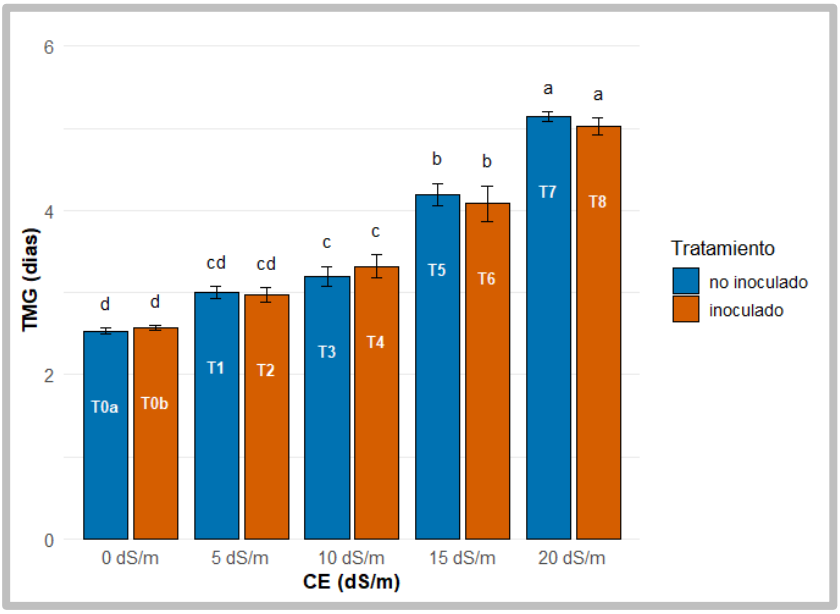
Comparación de medias del tiempo medio de germinación – TMG (días) entre tratamientos en función de la inoculación con Bacillus velezensis y concentración de NaCl.

Tratamiento		Concentración NaCl (dS/m)	TMG (días)	Error estándar	grupos
T0a	no inoculado	0	2.53	0.04	**d**
T0b	inoculado	0	2.57	0.03	**d**
T1	no inoculado	5	3.00	0.07	**cd**
T2	inoculado	5	2.97	0.09	**cd**
T3	no inoculado	10	3.20	0.12	**c**
T4	inoculado	10	3.32	0.14	**c**
T5	no inoculado	15	4.19	0.14	**b**
T6	inoculado	15	4.08	0.22	**b**
T7	no inoculado	20	5.14	0.06	**a**
T8	inoculado	20	5.02	0.10	**a**

* Resultados de la prueba de comparación múltiple HSD de Tukey (α = 0.05).

Figura 5.

Comparación gráfica de las medias del tiempo medio de gterminacion – TMG (dias)



4.1.4. COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD DE GERMINACIÓN - (CUG)

El análisis de varianza mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para el coeficiente de uniformidad de germinación (CUG) ($F = 13.63$; $p < 0.001$), con un coeficiente de variación de 17.86 %. El mayor valor se registró en el tratamiento sin salinidad y sin inoculación (T0a), con 1.52, seguido del tratamiento inoculado sin salinidad (T0b), con 1.33. Conforme aumentó la salinidad, el CUG presentó una tendencia descendente: a 5 dS/m se registraron valores de 1.03 y 1.05 en los tratamientos sin inoculación (T1) y con inoculación (T2), respectivamente; a 10 dS/m, los valores fueron de 0.90 en T3 y 0.92 en T4. A 15 dS/m, el CUG disminuyó a 0.70 y 0.71 en T5 y T6, mientras que a 20 dS/m alcanzó los valores más bajos, con 0.63 en T7 y 0.57 en T8. La prueba de Tukey ubicó a T0a en el grupo “a” y a T7 en el grupo “d”, lo que evidencia una diferencia estadística entre ambos tratamientos. Sin embargo, debido a que varios tratamientos intermedios compartieron letras con otros grupos, no todas las diferencias entre concentraciones salinas fueron estadísticamente significativas.

La disminución del CUG a medida que aumentó la salinidad sugiere que la germinación se desarrolló de manera menos uniforme bajo condiciones salinas, de acuerdo con el índice empleado en esta investigación. Este comportamiento puede relacionarse con las diferencias en la respuesta de las semillas al estrés salino, que pueden manifestarse en el momento en que germinan y en la velocidad con la que progresa el proceso. Zhang et al. (2021), al evaluar germoplasma de arroz bajo estrés salino, encontraron variaciones en indicadores relacionados con la germinación y el vigor entre los materiales estudiados. Este antecedente respalda que, la respuesta germinativa del arroz bajo salinidad no es uniforme. No obstante, como dichos estudios no evaluaron

necesariamente el mismo coeficiente de uniformidad utilizado en el presente ensayo, la comparación debe entenderse como evidencia complementaria sobre la variabilidad de la germinación, no como una demostración directa de un efecto sobre el CUG.

En cuanto a la inoculación con *Bacillus velezensis*, las diferencias numéricas entre los tratamientos inoculados y sus respectivos controles fueron reducidas. A 0 dS/m, el CUG fue menor en el tratamiento inoculado (1.33) que en el no inoculado (1.52); en cambio, a 5, 10 y 15 dS/m, los tratamientos inoculados presentaron valores ligeramente superiores a sus controles: 1.05 frente a 1.03, 0.92 frente a 0.90 y 0.71 frente a 0.70, respectivamente. A 20 dS/m, el tratamiento inoculado presentó un valor menor que el control, con 0.57 frente a 0.63. Sin embargo, cada par de tratamientos compartió al menos una letra en la prueba de Tukey, por lo que ninguna de estas diferencias fue estadísticamente significativa. En consecuencia, no se encontró evidencia suficiente para afirmar que la inoculación mejoró o redujo la uniformidad de la germinación en alguno de los niveles de salinidad evaluados.

Aunque investigaciones como la de Gupta et al. (2023) han demostrado que determinados aislados bacterianos pueden mejorar la germinación y el vigor de plántulas de arroz bajo estrés salino, sus resultados corresponden a microorganismos diferentes de *B. velezensis* y no demuestran necesariamente un efecto sobre el CUG. Por tanto, en el presente ensayo, la respuesta de este indicador estuvo principalmente asociada con la tendencia creciente de la salinidad, mientras que no se detectó un efecto estadísticamente significativo de la inoculación. En conjunto, estos resultados sugieren que las concentraciones salinas elevadas estuvieron asociadas con una menor uniformidad de la germinación, aunque la magnitud de las diferencias debe interpretarse considerando los grupos estadísticos de Tukey.

Tabla 10.

ANOVA para el Coeficiente de uniformidad de germinación (CUG)

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F value	Pr(>F)	significancia
Tratamientos	9	3.412	0.3791	13.63	2.25e-08	***
Residuos	30	0.834	0.0278			

CV = 17.86 %

Tabla 11.

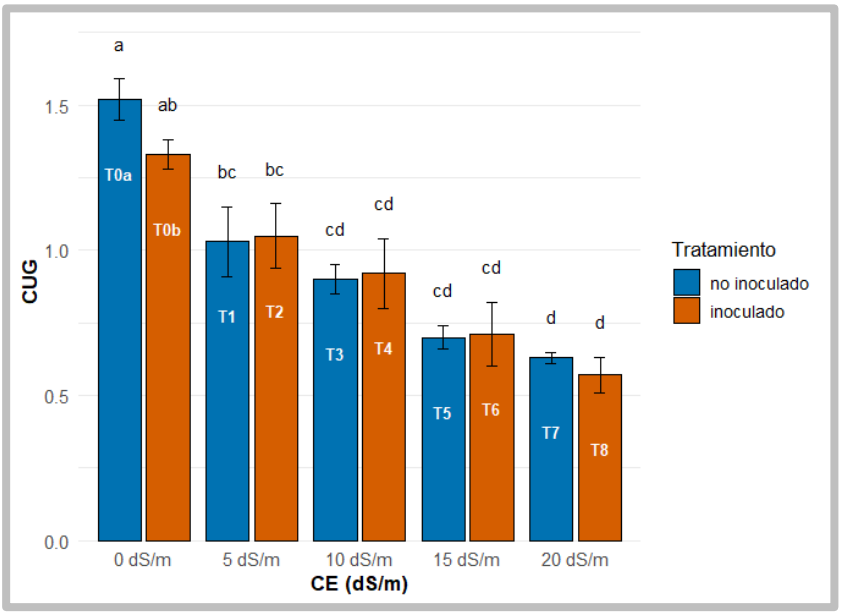
Comparación de medias del Coeficiente de uniformidad de germinación – CUG entre tratamientos en función de la inoculación con Bacillus velezensis y concentración de NaCl.

Tratamiento		Concentración NaCl (dS/m)	CUG	Error estándar	grupos
T0a	no inoculado	0	1.52	0.07	**a**
T0b	inoculado	0	1.33	0.05	**ab**
T1	no inoculado	5	1.03	0.12	**bc**
T2	inoculado	5	1.05	0.11	**bc**
T3	no inoculado	10	0.90	0.05	**cd**
T4	inoculado	10	0.92	0.12	**cd**
T5	no inoculado	15	0.70	0.04	**cd**
T6	inoculado	15	0.71	0.11	**cd**
T7	no inoculado	20	0.63	0.02	**d**
T8	inoculado	20	0.57	0.06	**d**

* Resultados de la prueba de comparación múltiple HSD de Tukey (α = 0.05)

Figura 6.

Comparación gráfica de las medias del Coeficiente de uniformidad de germinacion – CUG



4.2. CRECIMIENTO Y VIGOR DURANTE LAS PRIMERAS ETAPAS DE DESARROLLO DEL ARROZ (*ORYZA SATIVA* L.)

4.2.1. ALTURA DE PLANTA - ALT (cm)

El análisis de varianza mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para la altura de plántula (ALT) ($F = 183.4$; $p < 0.001$), con un coeficiente de variación de 5.26 %. En términos generales, la altura disminuyó conforme aumentó la salinidad. El mayor valor se registró en el tratamiento inoculado sin salinidad (T0b), con 24.86 cm, mientras que el menor correspondió al tratamiento sin inoculación a 20 dS/m (T7), con 8.80 cm. En ausencia de salinidad, las alturas fueron de 20.66 cm en T0a y 24.86 cm en T0b. A 5 dS/m, se registraron 19.63 cm en el tratamiento sin inoculación (T1) y 22.02 cm en el inoculado (T2). A 10 dS/m, la altura fue de 15.30 cm en T3 y 18.25 cm en T4. En los

niveles más elevados de salinidad, las diferencias numéricas fueron menores: a 15 dS/m se obtuvieron 10.74 cm en T5 y 11.87 cm en T6, mientras que a 20 dS/m se registraron 8.80 cm en T7 y 9.21 cm en T8. La prueba de Tukey confirmó diferencias entre varios tratamientos, aunque los grupos estadísticos compartidos indican que no todas las comparaciones entre niveles salinos fueron significativas.

La reducción de la altura a medida que aumentó la salinidad evidencia una respuesta desfavorable del crecimiento inicial del arroz ante concentraciones elevadas de sales. Este comportamiento coincide con los resultados de estudios que han documentado disminuciones del crecimiento de las plántulas de arroz bajo estrés salino. Por ejemplo, Kang et al. (2021) encontraron que la salinidad redujo la longitud de los brotes y otros parámetros de crecimiento del arroz, mientras que la inoculación con determinados aislados bacterianos mitigó parcialmente esas reducciones. La reducción de la altura observada en el presente ensayo puede estar relacionada con el estrés osmótico y los desequilibrios iónicos asociados a la salinidad, que limitan el crecimiento vegetal. Sin embargo, estos mecanismos no se midieron directamente en esta investigación y deben considerarse explicaciones fisiológicas posibles.

En relación con la inoculación con *Bacillus velezensis*, la prueba de Tukey mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos inoculados y sus respectivos controles a 0, 5 y 10 dS/m. En estos niveles, las plántulas inoculadas alcanzaron alturas de 24.86, 22.02 y 18.25 cm, respectivamente, superiores a los 20.66, 19.63 y 15.30 cm registrados en los tratamientos sin inoculación. Las diferencias fueron de 4.20, 2.39 y 2.95 cm, equivalentes aproximadamente a incrementos del 20.3 %, 12.2 % y 19.3 % respecto de sus controles. En cambio, a 15 dS/m, aunque la altura fue numéricamente superior con inoculación (11.87 frente

a 10.74 cm), los tratamientos compartieron una letra en la prueba de Tukey, por lo que la diferencia no fue significativa. A 20 dS/m tampoco se detectaron diferencias significativas entre el tratamiento inoculado y el no inoculado (9.21 frente a 8.80 cm).

Estos resultados indican que la respuesta de la altura a la inoculación dependió del nivel de salinidad: se observaron diferencias favorables en los niveles de 0, 5 y 10 dS/m, pero no se encontró evidencia estadística de un efecto sobre la altura a 15 y 20 dS/m. Este patrón es comparable, en términos generales, con investigaciones que han encontrado que determinados aislados bacterianos promotores del crecimiento pueden mejorar la longitud de los brotes de arroz bajo condiciones normales y salinas. Gupta et al. (2023), por ejemplo, reportaron mejoras en el crecimiento de plántulas inoculadas con determinados aislados bacterianos bajo estrés salino. Asimismo, Kang et al. (2021) describieron mejoras en la longitud de los brotes y otros atributos de crecimiento después de inocular arroz con cepas bacterianas seleccionadas. No obstante, estos estudios utilizaron microorganismos diferentes, por lo que constituyen antecedentes de comparación y no evidencia directa sobre el mecanismo de acción de la cepa de *B. velezensis* evaluada aquí.

Tabla 12.
ANOVA para la altura de plántula (ALT - cm)

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F value	Pr(>F)	significancia
Tratamientos	9	1190	132.22	183.4	<2e-16	***
Residuos	30	21.6	0.72			

CV = 5.26 %

Tabla 13.

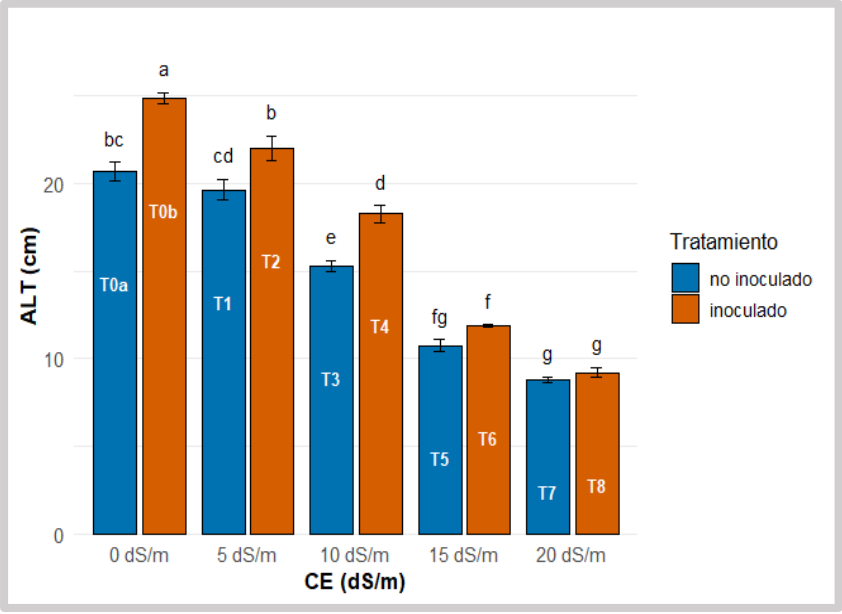
Comparación de medias de la altura de planta– ALT (cm) entre tratamientos en función de la inoculación con Bacillus velezensis y concentración de NaCl.

Tratamiento		Concentración NaCl (dS/m)	ALT (cm)	Error estándar	grupos
T0a	no inoculado	0	20.66	0.55	**bc**
T0b	inoculado	0	24.86	0.34	**a**
T1	no inoculado	5	19.63	0.59	**cd**
T2	inoculado	5	22.02	0.71	**b**
T3	no inoculado	10	15.30	0.30	**e**
T4	inoculado	10	18.25	0.46	**d**
T5	no inoculado	15	10.74	0.33	**fg**
T6	inoculado	15	11.87	0.07	**f**
T7	no inoculado	20	8.80	0.17	**g**
T8	inoculado	20	9.21	0.29	**g**

* Resultados de la prueba de comparación múltiple HSD de Tukey (α = 0.05)

Figura 7.

Comparación gráfica de las medias de la altura de planta – ALT (cm)



4.2.2. LONGITUD RADICULAR - LONGR (cm)

El análisis de varianza mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para la longitud de raíz (LONGR) ($F = 29.11$; $p = < 0.001$), con un coeficiente de variación de 9.81 %. El mayor valor se registró en el tratamiento inoculado sin salinidad (T0b), con 8.28 cm, seguido del tratamiento sin inoculación y sin salinidad (T0a), con 7.90 cm. En términos generales, la longitud radicular presentó una tendencia descendente conforme aumentó la salinidad. A 5 dS/m, se obtuvieron 6.96 cm en el tratamiento sin inoculación (T1) y 7.42 cm en el inoculado (T2). A 10 dS/m, los valores fueron de 6.60 cm en T3 y 7.83 cm en T4. A 15 dS/m, la longitud de raíz disminuyó a 4.72 cm en T5 y 5.43 cm en T6. Finalmente, a 20 dS/m, se registraron los menores valores, con 4.11 cm en el tratamiento sin inoculación (T7) y 3.78 cm en el inoculado (T8). La prueba de Tukey mostró diferencias entre algunos tratamientos, aunque los grupos estadísticos compartidos indican que no todas las comparaciones entre niveles de salinidad fueron significativas.

La reducción de la longitud radicular en las concentraciones salinas más elevadas sugiere que el estrés salino limitó el crecimiento de las raíces de las plántulas de arroz. Este resultado concuerda con investigaciones que han documentado una disminución del desarrollo radicular bajo salinidad y han evaluado el potencial de bacterias promotoras del crecimiento para atenuar dicha respuesta. Por ejemplo, Kang et al. (2021) observaron que la salinidad redujo la longitud de raíz del arroz, mientras que la inoculación con determinados aislados de Bacillus mejoró este atributo bajo condiciones salinas. Asimismo, Ali et al. (2022) encontró que algunas cepas de Bacillus mejoraron parámetros morfológicos de las raíces de arroz tanto en condiciones normales como bajo estrés salino. La disminución del crecimiento radicular observada en el presente ensayo puede relacionarse con las limitaciones en la

absorción de agua y los efectos del desequilibrio iónico asociados a la salinidad. Sin embargo, dado que estos procesos fisiológicos no se midieron directamente, deben considerarse explicaciones posibles y no mecanismos demostrados por los resultados obtenidos.

En cuanto a la inoculación con *Bacillus velezensis*, las raíces de las plántulas inoculadas presentaron longitudes numéricamente superiores a las de sus respectivos controles en las concentraciones de 0, 5, 10 y 15 dS/m. Las diferencias fueron de 0.38, 0.46, 1.23 y 0.71 cm, respectivamente. En cambio, a 20 dS/m, la longitud radicular fue 0.33 cm menor en el tratamiento inoculado que en el no inoculado. No obstante, en todos los niveles de salinidad los tratamientos inoculados y sus respectivos controles compartieron al menos una letra en la prueba de Tukey. Por consiguiente, ninguna de estas diferencias fue estadísticamente significativa y no se encontró evidencia suficiente para afirmar que la inoculación modificó la longitud de raíz bajo las condiciones evaluadas.

Esta respuesta difiere parcialmente de estudios en los que determinadas bacterias promotoras del crecimiento mejoraron significativamente el desarrollo radicular del arroz bajo salinidad. Kang et al. (2021), por ejemplo, reportaron incrementos en la longitud de raíz con aislados bacterianos seleccionados, mientras que Gupta et al. (2023) encontraron respuestas favorables en el crecimiento radicular con bacterias específicas sometidas a estrés salino. Sin embargo, estos estudios evaluaron cepas distintas de la utilizada en la presente investigación, por lo que sus resultados no pueden extrapolarse directamente a *B. velezensis*. La ausencia de diferencias significativas en este ensayo indica que los incrementos numéricos observados en cuatro niveles de salinidad no constituyen evidencia estadística de un efecto promotor sobre la longitud radicular.

Tabla 14.

Análisis de varianza para longitud radicular (LONGR - cm)

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F value	Pr(>F)	significancia
Tratamientos	9	100.09	11.12	29.11	1.92e-12	***
Residuos	30	11.46	0.38			

CV = 9.81 %

Tabla 15.

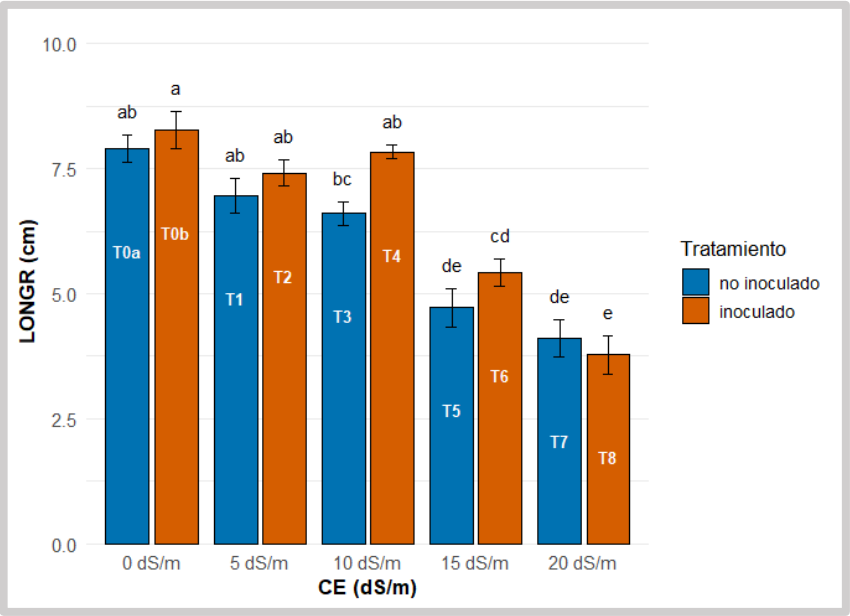
Comparación de medias de la longitud radicular – LONGR (cm) entre tratamientos en función de la inoculación con Bacillus velezensis concentración de NaCl.

Tratamiento		Concentración NaCl (dS/m)	LONGR (cm)	Error estándar	grupos
T0a	no inoculado	0	7.90	0.26	**ab**
T0b	inoculado	0	8.28	0.37	**a**
T1	no inoculado	5	6.96	0.34	**ab**
T2	inoculado	5	7.42	0.26	**ab**
T3	no inoculado	10	6.60	0.22	**bc**
T4	inoculado	10	7.83	0.14	**ab**
T5	no inoculado	15	4.72	0.39	**de**
T6	inoculado	15	5.43	0.27	**cd**
T7	no inoculado	20	4.11	0.36	**de**
T8	inoculado	20	3.78	0.38	**e**

* Resultados de la prueba de comparación múltiple HSD de Tukey (α = 0.05)

Figura 8.

Comparación gráfica de las medias de la longitud radicular – LONGR (cm)



4.2.3. ÍNDICE DE VIGOR DE PLÁNTULAS (VIG)

El análisis de varianza evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para el índice de vigor de plántulas (VIG) (F = 38.25; < 0.001), con un coeficiente de variación de 13.81 %. El mayor valor se registró en el tratamiento inoculado sin salinidad (T0b), con 27.45, seguido del tratamiento sin inoculación y sin salinidad (T0a), con 24.74. Conforme aumentó la salinidad, el VIG presentó una tendencia descendente. A 5 dS/m, los valores fueron de 18.69 en el tratamiento sin inoculación (T1) y 22.41 en el inoculado (T2). A 10 dS/m, se registraron 16.85 en T3 y 18.87 en T4. En los tratamientos sometidos a 15 dS/m, el VIG disminuyó a 9.93 en T5 y 10.81 en T6; mientras que, a 20 dS/m, se obtuvieron valores de 8.09 en T7 y 8.01 en T8. La prueba de Tukey ubicó a los tratamientos sin salinidad en el grupo “a” y a los tratamientos de 15 y 20 dS/m en el grupo “d”, lo que evidencia una reducción

significativa del vigor entre las condiciones sin salinidad y las de mayor concentración salina. No obstante, debido a que algunos tratamientos de salinidad intermedia compartieron letras con otros grupos, no todas las diferencias entre concentraciones fueron estadísticamente significativas.

La disminución del VIG a medida que aumentó la salinidad indica que las condiciones salinas afectaron el desarrollo inicial de las plántulas de arroz. Este resultado concuerda con Hussain et al. (2022), quienes evaluaron diez cultivares de arroz bajo concentraciones crecientes de NaCl y encontraron reducciones en la germinación, la longitud de brotes y raíces, el peso seco y el índice de vigor, con efectos más intensos a 19.2 y 25.6 dS/m. Esta correspondencia sugiere que el estrés salino puede limitar el vigor mediante sus efectos combinados sobre la germinación y el crecimiento de las plántulas. Sin embargo, la magnitud de la respuesta puede variar según el material vegetal, la concentración salina y las condiciones experimentales. En el presente estudio, la reducción del VIG fue especialmente marcada a partir de 15 dS/m, donde los valores descendieron aproximadamente a la mitad de los registrados en los tratamientos sin salinidad.

Respecto a la inoculación con *Bacillus velezensis*, los tratamientos inoculados presentaron valores numéricamente superiores a sus controles a 0, 5, 10 y 15 dS/m. Las diferencias fueron de 2.71, 3.72, 2.02 y 0.88 unidades, respectivamente. En cambio, a 20 dS/m, el VIG fue ligeramente menor en el tratamiento inoculado (8.01) que en el no inoculado (8.09). Sin embargo, todas las parejas de tratamientos inoculados y no inoculados compartieron al menos una letra en la prueba de Tukey, por lo que ninguna diferencia fue estadísticamente significativa. En consecuencia, aunque se observaron incrementos numéricos del vigor en cuatro de los cinco niveles evaluados, no se encontró evidencia estadística suficiente para atribuir dichos incrementos a la inoculación.

Otros estudios han reportado efectos favorables de determinadas bacterias promotoras del crecimiento sobre el vigor del arroz bajo estrés salino. Por ejemplo, la investigación de Ali et al. (2022) encontró que algunas cepas de Bacillus aumentaron el índice de vigor y mejoraron parámetros de crecimiento radicular bajo diferentes concentraciones salinas. De manera similar, Gupta et al. (2023) observaron mejoras en el vigor de plántulas de arroz mediante la inoculación con determinados aislados bacterianos bajo condiciones de salinidad elevada. No obstante, estos estudios utilizaron cepas distintas de la evaluada en el presente ensayo, por lo que sus resultados constituyen antecedentes comparativos y no demuestran que *B. velezensis* produzca necesariamente la misma respuesta.

Tabla 16.

Análisis de varianza para el índice de vigor de plántulas (VIG)

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F value	Pr(>F)	significancia
Tratamientos	9	1806.1	200.68	38.25	5.03e-14	***
Residuos	30	157.4	5.25			

CV = 13.81 %

Tabla 17.

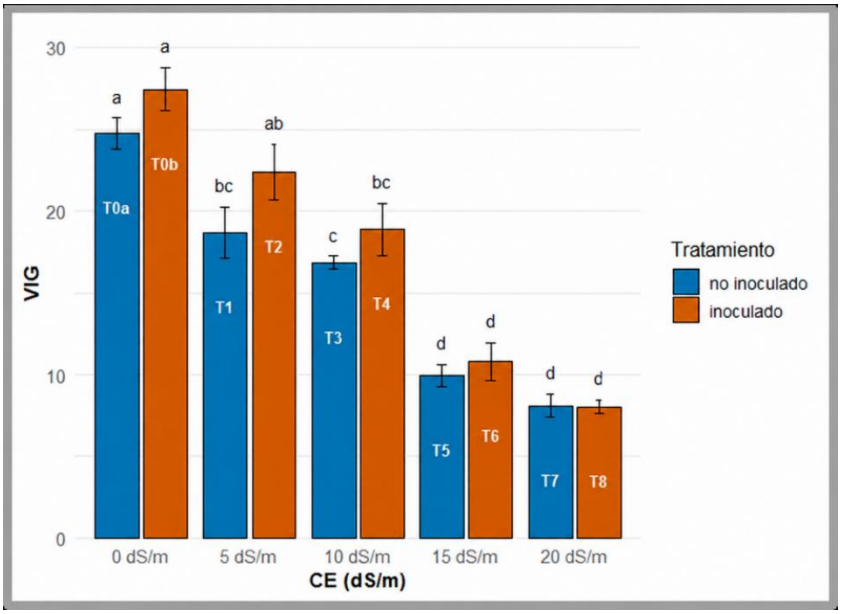
Comparación de medias del índice de vigor entre tratamientos en función de la inoculación con Bacillus velezensis y concentración de NaCl.

Tratamiento		Concentración NaCl (dS/m)	VIG	Error estándar	grupos
T0a	no inoculado	0	24.74	0.96	**a**
T0b	inoculado	0	27.45	1.31	**a**
T1	no inoculado	5	18.69	1.54	**bc**
T2	inoculado	5	22.41	1.70	**ab**
T3	no inoculado	10	16.85	0.39	**c**
T4	inoculado	10	18.87	1.61	**bc**
T5	no inoculado	15	9.93	0.69	**d**
T6	inoculado	15	10.81	1.15	**d**
T7	no inoculado	20	8.09	0.71	**d**
T8	inoculado	20	8.01	0.42	**d**

* Resultados de la prueba de comparación múltiple HSD de Tukey (α = 0.05)

Figura 9.

Comparación gráfica de las medias del indice de vigor– VIG



4.3. ANÁLISIS DE SUPERVIVENCIA DE PLÁNTULAS DE ARROZ (*Oryza sativa* L.)

El análisis de supervivencia permitió evaluar la mortalidad de las plántulas de arroz a lo largo del periodo de seguimiento bajo diferentes concentraciones de salinidad, así como comparar la respuesta de los tratamientos inoculados y no inoculados con *Bacillus velezensis*. Los resultados mostraron que la mortalidad acumulada aumentó con la concentración salina, mientras que la asociación entre inoculación y supervivencia varió según el nivel de estrés. A 5 dS/m, la mortalidad fue de 11.84 % en el tratamiento sin inoculación (T1) y de 6.85 % en el inoculado (T2), lo que correspondió a supervivencias de 88.16 % y 93.15 %, respectivamente. además, el modelo de riesgos proporcionales de Cox no proporcionó una estimación del hazard ratio (HR) en el análisis definitivo. Por ello, no fue posible cuantificar mediante este modelo la magnitud relativa del riesgo instantáneo de muerte entre el tratamiento inoculado (T2) y el tratamiento sin inoculación (T1), establecido como referencia. En este nivel de salinidad, la interpretación se basó en la mortalidad observada y en la comparación de las curvas de supervivencia mediante la prueba de Log-rank, que no evidenció diferencias estadísticamente significativas entre ambos tratamientos ($p=0.298$). La ausencia de una estimación del HR limita la interpretación de la magnitud de la asociación entre inoculación y riesgo de muerte en este nivel de salinidad.

A 10 dS/m, la mortalidad aumentó a 69.14 % en el tratamiento sin inoculación (T3) y a 60.00 % en el inoculado (T4), equivalentes a supervivencias de 30.86 % y 40.00 %, respectivamente. Aunque el tratamiento inoculado presentó una mortalidad acumulada menor, la comparación mediante Log-rank no evidenció diferencias significativas entre las curvas ($\chi^2 = 2.8$; p ajustado = 0.128). De manera concordante, el modelo de riesgos proporcionales de Cox estimó una razón de riesgos (HR) de 0.723, equivalente a una reducción estimada del 27.7 % en el riesgo instantáneo de muerte para el tratamiento inoculado respecto del control.

No obstante, el intervalo de confianza del HR (0.49-1.07) incluyó el valor 1, por lo que esta diferencia no fue estadísticamente concluyente.

En los niveles de salinidad más elevados se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos. A 15 dS/m, la mortalidad fue de 73.13 % en el tratamiento sin inoculación (T5) y de 52.31 % en el inoculado (T6), con supervivencias de 26.87 % y 47.69 %, respectivamente. La prueba de Log-rank identificó diferencias significativas entre las curvas de supervivencia ($\chi^2 = 8.1$; p ajustado = 0.009). El modelo de Cox estimó un HR de 0.531, correspondiente a una reducción del 47.0 % en el riesgo instantáneo de muerte asociado con la inoculación. El intervalo de confianza (0.34-0.82) no incluyó el valor 1, lo que respalda la significación estadística de esta asociación. De forma similar, a 20 dS/m, la mortalidad alcanzó 83.08 % en el tratamiento sin inoculación (T7) y 63.49 % en el inoculado (T8), mientras que la supervivencia fue de 16.92 % y 36.51 %, respectivamente. La prueba de Log-rank mostró diferencias significativas entre ambas curvas ($\chi^2 = 9.9$; p ajustado = 0.006), y el modelo de Cox estimó un HR de 0.514, equivalente a una reducción del 48.6 % en el riesgo instantáneo de muerte, con un intervalo de confianza de 0.34-0.78. Estos resultados indican que, en las condiciones evaluadas, la inoculación estuvo asociada con una mayor supervivencia a 15 y 20 dS/m, aunque no eliminó el efecto adverso de la salinidad.

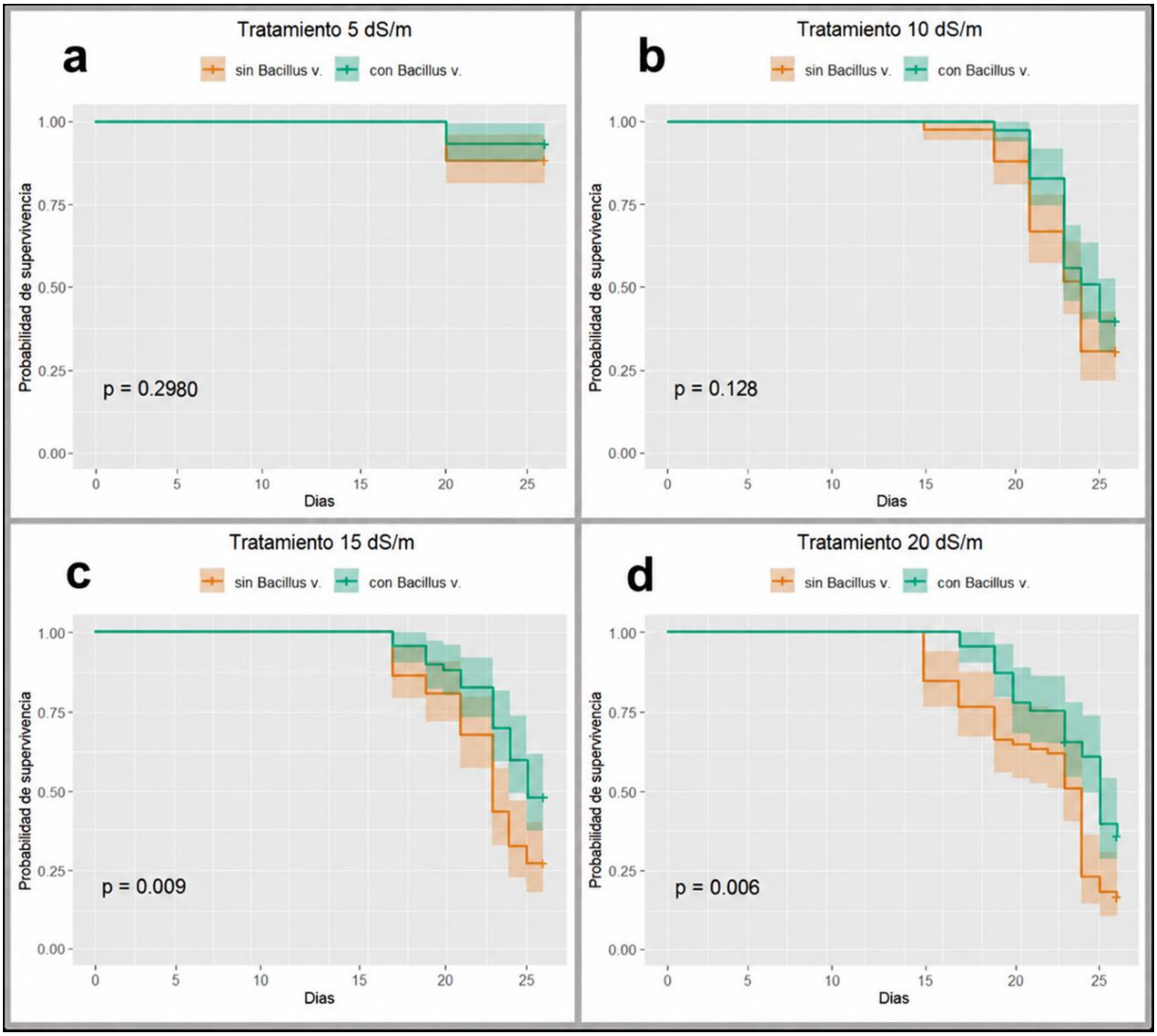
La tendencia al aumento de la mortalidad con la salinidad concuerda con estudios que han documentado los efectos perjudiciales del estrés salino sobre el crecimiento y la supervivencia del arroz. La exposición a concentraciones elevadas de sales puede afectar el equilibrio iónico, la absorción de agua y los procesos fisiológicos necesarios para mantener el crecimiento vegetal. Además, la duración de la exposición al estrés puede influir en la magnitud del daño. En el presente ensayo, la disminución de la supervivencia desde los niveles de 5 dS/m hasta los de 15 y 20 dS/m muestra que la salinidad constituyó una condición de estrés importante durante el establecimiento de las plántulas.

En cuanto a la inoculación, los resultados son consistentes con investigaciones que han demostrado que determinadas bacterias promotoras del crecimiento vegetal pueden contribuir a mejorar la respuesta del arroz bajo estrés salino. Por ejemplo, estudios con cepas seleccionadas de rizobacterias halotolerantes han reportado una mayor supervivencia de plantas inoculadas bajo salinidad, en comparación con plantas no inoculadas. Asimismo, Kang et al. (2021) encontraron que determinadas cepas de Bacillus mejoraron el crecimiento y el índice de vigor del arroz bajo diferentes concentraciones salinas, aunque estos indicadores no equivalen directamente a la supervivencia evaluada en el presente estudio. Estos antecedentes respaldan la posibilidad de que algunos inoculantes bacterianos contribuyan a mitigar los efectos del estrés salino, pero las respuestas dependen de la cepa y de las condiciones experimentales. Por ello, los resultados de otras bacterias no demuestran por sí mismos el mecanismo de acción de *B. velezensis* en este ensayo.

Finalmente, la evaluación del supuesto de riesgos proporcionales del modelo de Cox no evidenció desviaciones estadísticamente significativas para los niveles de 10, 15 y 20 dS/m ($p = 0.21$, $p = 0.33$ y $p = 0.13$, respectivamente). Por tanto, no se encontró evidencia suficiente para rechazar el supuesto de riesgos proporcionales en estas comparaciones. En el nivel de 5 dS/m no se obtuvo una estimación del HR en el análisis definitivo, por lo que la interpretación se basa en la mortalidad observada y en la prueba de Log-rank. En conjunto, los resultados indican que la salinidad estuvo asociada con una reducción de la supervivencia, mientras que la inoculación con *B. velezensis* se relacionó con una mayor supervivencia a 15 y 20 dS/m. Esta asociación no fue estadísticamente significativa a 5 ni a 10 dS/m y debe interpretarse dentro de las condiciones experimentales evaluadas.

Figura 10.

Curvas de supervivencia de plántulas de arroz inoculadas y no inoculadas con Bacillus velezensis bajo diferentes concentración de NaCl.



Nota: Las curvas de supervivencia se estimaron mediante el método de Kaplan–Meier. Las diferencias entre tratamientos se evaluaron mediante la prueba de log-rank. (**a**) 5 dS/m; (**b**) 10 dS/m; (**c**) 15 dS/m; (**d**) 20 dS/m. NaCl = cloruro de sodio.

Tabla 18.

Mortalidad observada de plántulas de arroz bajo diferentes tratamientos de inoculación y salinidad.

Tratamiento	N	Muertes observadas	% Mortalidad
T1	76	9	11.84
T2	73	5	6.85
T3	81	56	69.14
T4	75	45	60
T5	67	49	73.13
T6	65	34	52.31
T7	65	54	83.08
T8	63	40	63.49

Tabla 19.

Resultados de la prueba de Log-Rank y Test de Cox para análisis de Supervivencia.

Salinidad (dS/m)	Comparación	Tratamiento de referencia	Test Log - Rank		Test Cox		
			χ^2	p de log-rank	HR	IC_HR	PH Cox (p-valor)
5	T2 vs. T1	T1 (sin inoculación)	1.1	0.298	No estimable	No estimable	No estimable
10	T4 vs. T3	T3 (sin inoculación)	2.8	0.128	0.723	0.49 – 1.07	0.21
15	T6 vs. T5	T5 (sin inoculación)	8.1	0.009	0.531	0.34 - 0.82	0.33
20	T8 vs. T7	T7 (sin inoculación)	9.9	0.006	0.514	0.34 - 0.78	0.13

Nota: χ^2 = estadístico chi-cuadrado de la prueba de Log-rank; p de Log-rank = valor de significación de la comparación entre curvas de supervivencia; HR = razón de riesgos instantáneos de muerte (hazard ratio); IC_HR = intervalo de confianza del 95 % del HR; PH Cox (p-valor) = valor de significación de la prueba del supuesto de riesgos proporcionales. En cada comparación, el tratamiento sin inoculación se estableció como referencia. Un HR inferior a 1 indica un menor riesgo instantáneo de muerte en el tratamiento inoculado respecto al tratamiento de referencia. A 5 dS/m, el HR no fue estimable en el análisis definitivo.

CAPITULO V

CONCLUSIONES

1. La inoculación con *Bacillus velezensis* no produjo diferencias estadísticamente significativas en el porcentaje de germinación, la velocidad media de germinación, el tiempo medio de germinación ni el coeficiente de uniformidad de germinación entre los tratamientos inoculados y no inoculados en ninguno de los niveles de salinidad evaluados. Por tanto, no se encontró evidencia estadística suficiente para atribuir al bioinoculante un efecto sobre los índices de germinación bajo las condiciones experimentales.
2. El efecto de la inoculación sobre el crecimiento inicial varió según la variable evaluada y la concentración salina. La altura de las plántulas fue significativamente mayor en los tratamientos inoculados a 0, 5 y 10 dS/m, con valores de 24.86, 22.02 y 18.25 cm, respectivamente, frente a 20.66, 19.63 y 15.30 cm en sus controles. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas en la altura a 15 y 20 dS/m, ni en la longitud radicular y el índice de vigor en ninguno de los niveles salinos. En consecuencia, la respuesta favorable de la inoculación se limitó a la altura de las plántulas bajo condiciones de salinidad baja e intermedia.
3. El análisis de supervivencia evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos inoculados y no inoculados a 15 y 20 dS/m, pero no a 5 y 10 dS/m. El modelo de Cox estimó reducciones del riesgo instantáneo de muerte del 46.9 % y 48.6 % en los tratamientos inoculados a 15 y 20 dS/m, respectivamente. Estos resultados indican una asociación favorable entre la inoculación con *B. velezensis* y la supervivencia de las plántulas bajo salinidad elevada, en las condiciones controladas del experimento

CAPITULO VI

RECOMENDACIONES

Es necesario considerar que los ensayos fueron desarrollados bajo condiciones controladas, empleando recipientes y un sustrato de arena estéril, lo que permitió aislar el efecto de la inoculación y la salinidad, pero no refleja totalmente la complejidad de los sistemas agrícolas reales. Factores como el microbioma nativo del suelo, las propiedades físico-químicas del terreno, las variaciones ambientales y el manejo del riego pueden modificar de manera importante la interacción planta–microorganismo y, por tanto, la respuesta del cultivo. Además, el estudio se centró en una sola cepa de *B. velezensis*, sin evaluar la dinámica microbiana en la rizosfera ni los mecanismos bioquímicos específicos implicados en la tolerancia al estrés.

A partir de estas consideraciones, se plantean las siguientes recomendaciones para investigaciones futuras:

1. Se recomienda repetir el ensayo bajo condiciones controladas similares, con el fin de confirmar la reproducibilidad de los resultados obtenidos y fortalecer la confiabilidad experimental del efecto observado de *B. velezensis* frente al estrés salino.
2. Se recomienda evaluar la eficacia de *Bacillus velezensis* bajo distintos tipos de estrés salino, incluyendo suelos salinos, sódicos y salino-sódicos, así como diferentes composiciones iónicas, con el fin de determinar la amplitud de su efecto mitigador frente a condiciones más representativas de los sistemas agrícolas.
3. Es necesario validar el desempeño de *B. velezensis* en condiciones de campo, considerando diferentes tipos de suelo, variabilidad climática y prácticas de manejo agronómico. Asimismo, se sugiere incluir variables fisicoquímicas del suelo, como pH, conductividad eléctrica, relación de

adsorción de sodio (RAS) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI), para una mejor interpretación de la respuesta del cultivo.

4. Se recomienda evaluar si el efecto promotor observado en etapas iniciales del cultivo se mantiene durante fases posteriores del desarrollo, como crecimiento vegetativo, floración y rendimiento, a fin de determinar su impacto sobre la productividad final.
5. Dado que el presente estudio evaluó una única estrategia de inoculación, se sugiere determinar la dosis óptima, frecuencia de aplicación y método de inoculación más eficiente de *B. velezensis* (tratamiento de semilla, aplicación al sustrato o fertirriego), con el propósito de maximizar su efecto benéfico y facilitar su aplicación agronómica.
6. Es importante determinar la capacidad de colonización, supervivencia y persistencia de *B. velezensis* en la rizosfera bajo condiciones salinas, con el fin de comprender la estabilidad de su efecto y su relación con la tolerancia al estrés salino.
7. Se recomienda comparar el desempeño de *B. velezensis* con otras bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), hongos micorrícicos arbusculares o consorcios microbianos, con el objetivo de identificar alternativas más eficientes o posibles efectos sinérgicos en la mitigación del estrés salino.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aasfar Abderrahim, Bargaz Adnane, Yaakoubi Kaoutar, Hilali Abderraouf, Bennis Iman, Zeroual Youssef, & Meftah Kadmiri Issam. (2021). Nitrogen Fixing Azotobacter Species as Potential Soil Biological Enhancers for Crop Nutrition and Yield Stability. *Frontiers in Microbiology*, *12*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.628379

Abd El-Daim, I. A., Bejai, S., & Meijer, J. (2019). Bacillus velezensis 5113 Induced Metabolic and Molecular Reprogramming during Abiotic Stress Tolerance in Wheat. *Scientific Reports*, *9*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-019-52567-x

Aguilar Portero, M., Fernández Ramírez, J. L., Aguilar Blanes, M., & Ortiz Romero, C. (2016). *Respuesta Agronómica Del Arroz Al Riego Salino En Distintas Fases Del Cultivo*. https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/servifapa/registro-servifapa/6667c7f8-1905-4671-aaf9-5d2122b621d6

Ali, Q., Ayaz, M., Mu, G., Hussain, A., Yuanyuan, Q., Yu, C., Xu, Y., Manghwar, H., Gu, Q., Wu, H., & Gao, X. (2022). Revealing plant growth-promoting mechanisms of Bacillus strains in elevating rice growth and its interaction with salt stress. *Frontiers in Plant Science*, *13*. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.994902

Allouzi, M. M. A., Allouzi, S. M. A., Keng, Z. X., Supramaniam, C. V., Singh, A., & Chong, S. (2022). Liquid biofertilizers as a sustainable solution for agriculture. *Heliyon*, *8*(12), e12609. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12609

An L, Tao Y, Chen H, He M, Xiao F, Li G, Ding Y and Liu Z (2020) Embryo-Endosperm Interaction and Its Agronomic Relevance to Rice Quality. Front. Plant Sci. 11:587641. doi: 10.3389/fpls.2020.587641

Aravind, J., Vimala Devi, S., Radhamani, J., Jacob, S. R., & Kalyani Srinivasan. (2026). The germinationmetrics package: A brief introduction. ICAR–National Bureau of Plant Genetic Resources. https://aravind-j.github.io/germinationmetrics/articles/Introduction.html

Ashik Mahmud, F.M. Aminul Islam, Md. Mehede Hassan Rubel, Sanjoy Kumar Mukharjee, Manish Kumar, Prosun Bhattacharya, Firoz Ahmed. (2023). Effects of halotolerant rhizobacteria on rice seedlings under salinity stress. Science of The Total Environment. Volume 892. ISSN 0048-9697. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163774.

Asif, S., Jan, R., Kim, N., Asaf, S., Lubna, Khan, M. A., Kim, E. G., Jang, Y. H., Bhatta, D., Lee, I. J., & Kim, K. M. (2023). Halotolerant endophytic bacteria alleviate salinity stress in rice (oryza sativa L.) by modulating ion content,

endogenous hormones, the antioxidant system and gene expression. BMC plant biology, 23(1), 494. https://doi.org/10.1186/s12870-023-04517-z

Ayaz, M., Ali, Q., Jiang, Q., Wang, R., Wang, Z., Mu, G., Khan, S. A., Khan, A. R., Manghwar, H., Wu, H., Gao, X., & Gu, Q. (2022). Salt Tolerant Bacillus Strains Improve Plant Growth Traits and Regulation of Phytohormones in Wheat under Salinity Stress. *Plants*, *11*(20). https://doi.org/10.3390/plants11202769

Bai, Y., Zhou, Y., Yue, T., Huang, Y., He, C., Jiang, W., Liu, H., Zeng, H., & Wang, J. (2023). Plant growth-promoting rhizobacteria Bacillus velezensis JB0319 promotes lettuce growth under salt stress by modulating plant physiology and changing the rhizosphere bacterial community. *Environmental and Experimental Botany*, *213*. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105451

Bartlett, M. S. (1937). Properties of sufficiency and statistical tests. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 160(901), 268–282. https://doi.org/10.1098/rspa.1937.0109

Basu, S., Roychoudhury, A., Saha, P. P., & Sengupta, D. N. (2010). Comparative analysis of some biochemical responses of three indica rice varieties during polyethylene glycol-mediated water stress exhibits distinct varietal differences. *Acta Physiologiae Plantarum*, *32*(3), 551–563. https://doi.org/10.1007/s11738-009-0432-y

Bewley, J. D., Bradford, K. J., Hilhorst, H. W. M., & Nonogaki, H. (2013). Germination. In *Seeds* (pp. 133–181). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4693-4_4

Bind, S., Bind, S., & Chandra, D. (2023). Beneficial microbes for sustainable agroecosystem. In *Advanced Microbial Techniques in Agriculture, Environment, and Health Management* (pp. 1–19). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91643-1.00008-9

Compant, S., Duffy, B., Nowak, J., Clément, C., & Barka, E. A. (2005). Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: Principles, mechanisms of action, and future prospects. In *Applied and Environmental Microbiology* (Vol. 71, Issue 9, pp. 4951–4959). https://doi.org/10.1128/AEM.71.9.4951-4959.2005

Cordiano, R., Di Gioacchino, M., Mangifesta, R., Panzera, C., Gangemi, S., & Minciullo, P. L. (2023). Malondialdehyde as a potential oxidative stress marker for allergy-oriented diseases: An update. Molecules, 28(16), 5979. https://doi.org/10.3390/molecules28165979

Daniel, A. I., Fadaka, A. O., Gokul, A., Bakare, O. O., Aina, O., Fisher, S., Burt, A. F., Mavumengwana, V., Keyster, M., & Klein, A. (2022). Biofertilizer: The Future

of Food Security and Food Safety. In *Microorganisms* (Vol. 10, Issue 6). MDPI. https://doi.org/10.3390/microorganisms10061220

De la Reguera, E., Veatch, J., Gedan, K., & Tully, K. L. (2020). The effects of saltwater intrusion on germination success of standard and alternative crops. *Environmental and Experimental Botany*, *180*. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104254

Desheva, G., Tosheva, S., Valchinova, E., & Pencheva, A. (2022). Effect of salt stress on rice seed germination and seedling growth. Trakia Journal of Sciences, 20(4), 303. https://doi.org/10.15547/tjs.2022.04.004

Ding, X., Shi, J., Gui, J., Zhou, H., Yan, Y., Zhu, X., Xie, B., Liu, X., & He, J. (2024). Rice seed protrusion quantitative trait loci mapping through genome-wide association study. Plants, 13(1), 134. https://doi.org/10.3390/plants13010134

Durbin, J., & Watson, G. S. (1950). TESTING FOR SERIAL CORRELATION IN LEAST SQUARES REGRESSION. I. *Biometrika*, *37*. http://biomet.oxfordjournals.org/

Ercole, T. G., Kava, V. M., Aluizio, R., Pauletti, V., Hungria, M., & Galli-Terasawa, L. V. (2023). Co-inoculation of Bacillus velezensis and Stenotrophomonas maltophilia strains improves growth and salinity tolerance in maize (Zea mays L.). *Rhizosphere*, *27*. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100752

Fahad, S., Adnan, M., Noor, M., Arif, M., Alam, M., Khan, I. A., Ullah, H., Wahid, F., Mian, I. A., Jamal, Y., Basir, A., Hassan, S., Saud, S., Amanullah, Riaz, M., Wu, C., Khan, M. A., & Wang, D. (2019). Major Constraints for Global Rice Production. In *Advances in Rice Research for Abiotic Stress Tolerance* (pp. 1–22). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814332-2.00001-0

Farooq, M., Park, J. R., Jang, Y. H., Kim, E. G., & Kim, K. M. (2021). Rice Cultivars Under Salt Stress Show Differential Expression of Genes Related to the Regulation of Na+/K+ Balance. *Frontiers in Plant Science*, *12*. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.680131

Foluso Ologundudu, A., Adelusi, A. A., & Akinwale, R. O. (2014). Effect of Salt Stress on Germination and Growth Parameters of Rice (Oryza sativa L.). *Notulae Scientia Biologicae*, *6*(2), 237–243. https://cabidigitallibrary.org

Gao, Y., Zhao, X., Liu, X., et al. (2024). OsRAV1 Regulates Seed Vigor and Salt Tolerance During Germination in Rice. Rice, 17, 56. https://doi.org/10.1186/s12284-024-00734-8

Gupta, A. G., Tiwari, R. K., Shukla, R., et al. (2023). Salinity alleviator bacteria in rice (Oryza sativa L.), their colonization efficacy, and synergism with melatonin.

Frontiers in Plant Science, 13, 1060287. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1060287

Hazra Anindita, Das Susmita. (2024). The molecular and metabolic events behind different germination stages of rice seeds: A metabolomics perspective. JSFA Reports; 4(3): 118–134. https://doi.org/10.1002/jsf2.185

Hussain, S., Cao, X., Zhong, C., Zhu, L., Khaskheli, M. A., Fiaz, S., Zhang, J., & Jin, Q. (2018). Sodium chloride stress during early growth stages altered physiological and growth characteristics of rice. *Chilean Journal of Agricultural Research*, *78*(2), 183–197. https://doi.org/10.4067/S0718-58392018000200183

Hussain, S., Liu, S., Zhang, R., Chen, Y., Adil, A., & Dai, Q. (2022). Germination and Early Seedling Growth Attributes of Rice (Oryza sativa L.) Cultivars under Different Salinity (NaCl) Stresses. The Philippine Agricultural Scientist, 105(4). https://www.ukdr.uplb.edu.ph/pas/vol105/iss4/10

Hussain, S., ZHANG, J. hua, ZHONG, C., ZHU, L. feng, CAO, X. chuang, YU, S. miao, Allen Bohr, J., HU, J. jie, & JIN, Q. yu. (2017). Effects of salt stress on rice growth, development characteristics, and the regulating ways: A review. In *Journal of Integrative Agriculture* (Vol. 16, Issue 11, pp. 2357–2374). Chinese Academy of Agricultural Sciences. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61608-8

INIA, I. N. de I. A. (2020). *INIA 515 - Capoteña*. https://hdl.handle.net/20.500.12955/1602

Ji, C., Wang, X., Song, X., Zhou, Q., Li, C., Chen, Z., Gao, Q., Li, H., Li, J., Zhang, P., & Cao, H. (2021). Effect ofBacillus velezensis JC-K3 on Endophytic Bacterial and Fungal Diversity in Wheat Under Salt Stress. *Frontiers in Microbiology*, *12*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.802054

Kalluru, S., Keerthi, I., Kommana, M., Withanawasam, D. M., Ramireddy, E., Reddy, D. M., Umamahesh, V., & Vemireddy, L. R. (2025). Enhancement of genetic gain for early seedling vigor traits through marker-assisted pedigree selection in rice (Oryza sativa L.). Physiology and molecular biology of plants: an international journal of functional plant biology, 31(7), 1161–1176. https://doi.org/10.1007/s12298-025-01635-w

Kang, S. M., et al. (2021). Rhizospheric Bacillus spp. Rescues Plant Growth Under Salinity Stress via Regulating Gene Expression, Endogenous Hormones, and Antioxidant System of Oryza sativa L. Frontiers in Plant Science, 12, 665590. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.665590

Kordrostami, M., Rabiei, B., & Hassani Kumleh, H. (2017). Biochemical, physiological and molecular evaluation of rice cultivars differing in salt tolerance

at the seedling stage. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, *23*(3), 529–544. https://doi.org/10.1007/s12298-017-0440-0

Kumar, A., Singh, S., Mukherjee, A., Rastogi, R. P., & Verma, J. P. (2021). Salt-tolerant plant growth-promoting Bacillus pumilus strain JPVS11 to enhance plant growth attributes of rice and improve soil health under salinity stress. *Microbiological Research*, *242*. https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126616

Li Pei, Yu – Hao Chen, Jun Lu, Chang-Quan Zhang, Liu Qiao-Quan, & Li Qian Feng (2022). Genes and Their Molecular Functions Determining Seed Structure, Components, and Quality of Rice. In Rice (Vol. 15, Issue 1). Springer. https://doi.org/10.1186/s12284-022-00562-8

Liu, C., Mao, B., Yuan, D., Chu, C., & Duan, M. (2022). Salt tolerance in rice: Physiological responses and molecular mechanisms. *Crop Journal*, *10*(1), 13–25. https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.02.010

Liu, L., Xia, W., Li, H., Zeng, H., Wei, B., Han, S., & Yin, C. (2018). Salinity inhibits rice seed germination by reducing α-amylase activity via decreased bioactive gibberellin content. *Frontiers in Plant Science*, *9*. https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.4421516

Li, W.-Y., Chen, B.-X., Chen, Z.-J., Gao, Y.-T., Chen, Z., & Liu, J. (2017). Reactive oxygen species generated by NADPH oxidases promote radicle protrusion and root elongation during rice seed germination. International Journal of Molecular Sciences, 18(1), 110. https://doi.org/10.3390/ijms18010110

Mahdi, I., Allaoui, A., Fahsi, N., & Biskri, L. (2022). Bacillus velezensis QA2 Potentially Induced Salt Stress Tolerance and Enhanced Phosphate Uptake in Quinoa Plants. *Microorganisms*, *10*(9). https://doi.org/10.3390/microorganisms10091836

Masmoudi, F., Tounsi, S., Dunlap, C. A., & Trigui, M. (2021). Endophytic halotolerant Bacillus velezensis FMH2 alleviates salt stress on tomato plants by improving plant growth and altering physiological and antioxidant responses. *Plant Physiology and Biochemistry*, *165*, 217–227. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.05.025

Mishra, P., Mishra, J., & Arora, N. K. (2021). Plant growth promoting bacteria for combating salinity stress in plants – Recent developments and prospects: A review. *Microbiological Research*, *252*, 126861. https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126861

Mohapatra, P.K., Sahu, B.B. (2022). Botany of Rice Plant. In: Panicle Architecture of Rice and its Relationship with Grain Filling. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67897-5_2

Moliner Aramendia, A., & Masaguer Rodríguez, A. (1996). Calidad de aguas para uso agrícola y efecto de la agricultura sobre la calidad del agua. En S. Garrido (Coord.), Prácticas agrarias compatibles con el medio natural: El agua (pp. 59–75). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Negrão, S., Courtois, B., Ahmadi, N., Abreu, I., Saibo, N., & Oliveira, M. M. (2011). Recent updates on salinity stress in rice: From physiological to molecular responses. *Critical Reviews in Plant Sciences*, *30*(4), 329–377. https://doi.org/10.1080/07352689.2011.587725

Nonogaki, H. (2014). Seed dormancy and germination-emerging mechanisms and new hypotheses. *Frontiers in Plant Science*, *5*(MAY). https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00233

Orozco-Mosqueda, M. del C., Santoyo, G., & Glick, B. R. (2023). Recent Advances in the Bacterial Phytohormone Modulation of Plant Growth. *Plants*, *12*(3). https://doi.org/10.3390/plants12030606

Pamuta, D., Siangliw, M., Sanitchon, J., Pengrat, J., Siangliw, J. L., Toojinda, T., & Theerakulpisut, P. (2022). Physio-biochemical traits in improved 'KDML105' jasmine rice lines containing drought and salt tolerance gene under drought and salt stress. *Chilean Journal of Agricultural Research*, *82*(1), 97–110. https://doi.org/10.4067/S0718-58392022000100097

Parvaiz A., & Satyawati S. (2008). Salt stress and phyto-biochemical responses of plants – a review. *PLANT SOIL ENVIRON.*, *54*, 89–99.

Patel, P., Bhatt, S., Patel, H., & Saraf, M. (2023). Iron chelating bacteria: a carrier for biofortication and plant growth promotion. *Journal of Biological Studies*, *3*, 111–120. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/plants12234054

Pérez-García, L.-A., Sáenz-Mata, J., Fortis-Hernández, M., Navarro-Muñoz, C. E., Palacio-Rodríguez, R., & Preciado-Rangel, P. (2023). Plant-growth-promoting rhizobacteria improve germination and bioactive compounds in cucumber seedlings. Agronomy, 13(2), Article 315. https://doi.org/10.3390/agronomy13020315

Rahnama, S., Ghehsareh Ardestani, E., Ebrahimi, A., & Nikookhah, F. (2023). Seed priming with plant growth-promoting bacteria (PGPB) improves growth and water stress tolerance of Secale montanum. Heliyon, 9(4), Article e15498. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15498

Ramamoorthy, V., Viswanathan, R., Raguchander, T., Prakasam, V., & Samiyappan, R. (2001). Induction of systemic resistance by plant growth promoting rhizobacteria in crop plants against pests and diseases. Crop Protection, 20(1), 1–11. https://doi.org/10.1016/S0261-2194(00)00056-9

Rehman Hakeem, K., Hamid Dar, G., Aneesul Mehmood, M., & Ahmad Bhat, R. (2020). Microbiota and Biofertilizers: A Sustainable Continuum for Plant and Soil Health. In *Microbiota and Biofertilizers: A Sustainable Continuum for Plant and Soil Health*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48771-3

Riaz, M., Arif, M. S., Ashraf, M. A., Mahmood, R., Yasmeen, T., Shakoor, M. B., Shahzad, S. M., Ali, M., Saleem, I., Arif, M., & Fahad, S. (2019). A Comprehensive Review on Rice Responses and Tolerance to Salt Stress. In *Advances in Rice Research for Abiotic Stress Tolerance* (pp. 133–158). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814332-2.00007-1

Rodrígez, N. D., Torres, C. N., & Chaman, M. E. (2019). Efecto del estrés salino en el crecimiento y contenido relativo del agua en las variedades IR-43 y amazonas de Oryza sativa “arroz” (Poaceae). *ARNALDOA*, *3*, 12. https://doi.org/http://doi.org/10.22497/arnaldoa.263.26305

Sarker, P. K., Karmoker, D., Shohan, M. U. S., Saha, A. K., Rima, F. S., Begum, R. A., Islam, M. R., & Seraj, Z. I. (2023). Effects of multiple halotolerant rhizobacteria on the tolerance, growth, and yield of rice plants under salt stress. Folia microbiologica, 68(1), 55–72. https://doi.org/10.1007/s12223-022-00997-y

Varietal Difference in Seed Germination under Different Levels of Salt Stress in Rice. *Agricultural Science Digest*, *45*(3), 482–488. https://doi.org/10.18805/ag.D-5747

Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Source: Biometrika*, *52*(3), 591–611.

Shrivastava, P., & Kumar, R. (2015). Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. In *Saudi Journal of Biological Sciences* (Vol. 22, Issue 2, pp. 123–131). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.12.001

Souza-Lemes, E., De Oliveira, S., Ciciliano-Tavares, L., Oliveira De Mendonça, A., Dias-Leitzke, I., Eduardo-Meneghello, G., Souza, A. C., & Barros, A. (2016). Productivity And Physiological Quality Of Irrigated Rice Seeds Under Salt Stress And Carbonized Rice Husk Ashes Fertilization. *Agrociencia*, *50*, 307–321. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952016000300307&script=sci_abstract

Stavi, I., Thevs, N., & Priori, S. (2021). Soil Salinity and Sodicity in Drylands: A Review of Causes, Effects, Monitoring, and Restoration Measures. In *Frontiers in Environmental Science* (Vol. 9). Frontiers Media S.A. https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.712831

Su, T., Shen, B., Hu, X., Teng, Y., Weng, P., Wu, Z., & Liu, L. (2024). Research advance of Bacillus velezensis: bioinformatics, characteristics, and applications. *Food Science and Human Wellness*, *13*(4), 1756–1766. https://doi.org/10.26599/FSHW.2022.9250148

Sunita, K., Mishra, I., Mishra, J., Prakash, J., & Arora, N. K. (2020). Secondary Metabolites From Halotolerant Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Ameliorating Salinity Stress in Plants. In *Frontiers in Microbiology* (Vol. 11). Frontiers Media S.A. https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.567768

Uçarlı, C. (2020). Effects of Salinity on Seed Germination and Early Seedling Stage. In *Estrés abiótico en las plantas*. www.intechopen.com

Uri, N. (2018). Cropland soil salinization and associated hydrology: Trends, processes and examples. In *Water (Switzerland)* (Vol. 10, Issue 8). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/w10081030

Yao, J., Chu, Q., Guo, X., Shao, W., Shang, N., Luo, K., Li, X., Chen, H., Cheng, Q., Mo, F., Zheng, D., Xu, F., Guo, F., Zhu, Q. H., Deng, S., Chu, C., Xu, X., Liu, H., & Fan, L. (2024). Spatiotemporal transcriptomic landscape of rice embryonic cells during seed germination. Developmental Cell, 59(17), 2320-2332.e5. https://doi.org/10.1016/j.devcel.2024.05.016

Yuvaraj, M., Subash, K., Bose, C., & Tawfik, E. (2020). Soil Salinity and Its Management. In Ram Swaroop Meena (Ed.), *Soil Moisture Importance*. https://doi.org/10.5772/intechopen.82898

Zhang, R., Hussain, S., Wang, Y., et al. (2021). Comprehensive Evaluation of Salt Tolerance in Rice (Oryza sativa L.) Germplasm at the Germination Stage. Agronomy, 11(8), 1569. https://doi.org/10.3390/agronomy11081569

Zou, P., Ma, S., Yuan, Y., Ma, J., Yang, X., Hu, X., Meng, Q., Jing, C., & Li, Y. (2024). A glucomannan produced by Bacillus velezensis HY23 and its growth promoting effect on soybeans under salt stress. *International Journal of Biological Macromolecules*, *275*. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133474

ANEXOS

ANEXO 1. EVIDENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DEL POTENCIAL DE *BACILLUS VELEZENSIS* EN CONDICIONES DE SALINIDAD.

Tabla 20.

Efectos de la inoculación de Bacillus velezensis en diversos cultivos bajo diferentes niveles de Salinidad.

Cultivo	Cepa de *Bacillus velezensis*	Dosis de NaCl	Efectos de mejora bajo estrés salino	Fuente
Lechuga	JB0319	0,50,100 y 150 (mM)	Incremento de la altura de brotes Incremento de la longitud de Raíces Incremento de la biomasa de los brotes Incremento de la actividad de enzimas con funciones antioxidantes Reducción de la peroxidación lipídica Incremento de azucares solubles Incremento del contenido de prolina	(Bai et al., 2023)
Tomate	FMH2	0,60,120 y 171 (mM)	Mejora del desarrollo, la estructura y densidad de pelos radiculares Mejora en el desarrollo de hojas y crecimiento de tallos Mejora de la tasa de crecimiento y emisión de hojas Incremento de la longitud de brotes Incremento del índice de sensibilidad (IS) IS>0 Incremento de la biomasa total y contenido de agua	(Masmoudi et al., 2021)
Quinua	QA2	0 y 400 (mM)	Incremento de la tasa de germinación Mejora en el desarrollo temprano de plántulas Incremento del índice de vigor Incremento de la longitud radicular y longitud de brotes Incremento de la biomasa de raíz y brotes Incremento del área foliar Incremento en el índice de contenido de clorofila	(Mahdi et al., 2022)

			Aumento del contenido de P, Ca y K en tejidos Reducción del contenido de Na en tejidos	
Trigo	JC-K3	No especificado	Incremento de la longitud de la planta Incremento de la longitud de la raíz Incremento de la biomasa de raíz y brotes Aumento del contenido de Azucares solubles Aumento del contenido total de clorofila Disminución de la concentración de sodio en brotes y raíces Aumento del contenido de K en brotes y raíces Incremento de la riqueza de la comunidad microbiana benéfica en raíces, brotes, hoja y suelo rizosférico.	(Ji et al., 2021)
Arroz	FZB42	0, 100, 150 y 200 (mmol)	Incremento del índice de vigor Incremento del diámetro, longitud y superficie total de raíces Incremento de la longitud de brotes Incremento de la biomasa de brotes Incremento de la actividad de enzima antioxidantes Aumento en la expresión de genes asociados con la respuesta de estrés abióticos Incremento de la riqueza de la comunidad microbiana benéfica en suelo rizosférico	(Ali et al., 2022)
Soja	HY23	No especificado	Incremento de la longitud de brotes Incremento de la biomasa de brotes Incremento del área foliar Incremento de la longitud de la Raíz Incremento de la biomasa de la Raíz Incremento de la cantidad y peso de nódulos radiculares Aumento en la actividad de la nitrogenasa, la glutamina sintetasa y el glutamato deshidrogenasa Aumento de la concentración total de nitrógeno en raíces y brotes	(Zou et al., 2024)
Maíz	LGMB12, LGMB319, LGMB426	75 y 100 (mM)	Incremento del área de la raíz Incremento del volumen total de la raíz Incremento del diámetro de Raíz Incremento de la longitud de la Raíz	(Ercole et al., 2023)

	Incremento de la biomasa de la parte aérea	
	Aumento en el número de hojas	
	Incremento del diámetro del tallo	

ANEXO 2. PARÁMETROS E ÍNDICES UTILIZADOS PARA CARACTERIZAR LA GERMINACIÓN Y EL DESARROLLO INICIAL DEL ARROZ.

Tabla 21.

Matriz de descripción de variables a evaluarse

Código	Variable	Dimensión	Formula	Fuente
PGER	Porcentaje de germinación	%	$PGER = \frac{Ng}{Nt}$ *100	(Aravind et al., 2026)
VMG	Velocidad Media de Germinación	Semillas germinadas/día	$VMG = \sum_{i=1}^{k} \frac{ni}{ti}$	(Aravind et al., 2026)
TMG	Tiempo medio de Germinación	días	$TMG = \frac{\sum niti}{ni}$	(Aravind et al., 2026)
CUG	Coeficiente de uniformidad de germinación	adimensional	$CUG = \frac{\sum ni}{\sum (TMG - ti)^2 ni}$	(Aravind et al., 2026)
ALT	altura de plántulas	cm		
LONGR	Longitud de raíces	cm		
VIG	Índice de Vigor	adimensional	$VIG = PGER * (LONGR + ALT)$	(Kalluru et al., 202)

ANEXO 3. DESCRIPCIÓN DE PROCEDIMIENTOS METODOLÓGICOS

1. Cálculo del volumen del recipiente de polipropileno

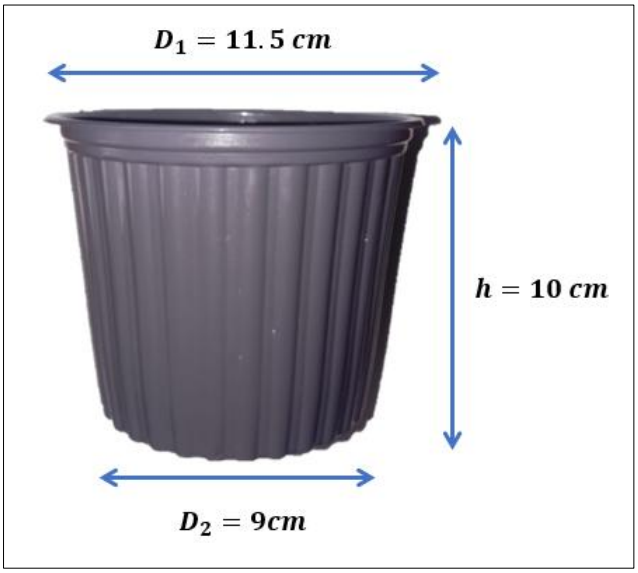
Diámetro mayor $D_1 = 11.5\ cm$ → radio mayor $R = 5.75\ cm$

Diámetro menor $D_2 = 9cm$ → radio menor $r = 4.5\ cm$

Altura $h = 10\ cm$

Figura 11.

Dimensiones del recipiente de Polipropileno.



Fórmula del volumen de un tronco de cono

$$V = \frac{1}{3}\pi h(R^2 + Rr + r^2)$$

Sustituyendo los valores

$$V = \frac{1}{3}\pi(10)(5.75^2 + 5.75\ X\ 4.5 + 4.5^2)$$

$$\boxed{V = 829.5\ cm^3\ \approx 830\ ml}$$

2. Cálculo del volumen de sustrato esterilizado por recipiente

Cálculo de ¾ de su volumen

$$V_{3/4} = \frac{3}{4}\ X\ 830\ ml$$

$$\boxed{V_{3/4} = \ 622.5\ ml\ \approx 623\ ml}$$

por cada recipiente se usará un volumen de 623 ml de sustrato estéril

Figura 12.

Calculo del volumen de solución a usar



Tabla 22.

Volumen total de soluciones salinas por cada tratamiento.

Nivel de salinidad (dS/m)	volumen de solución (ml)
0	800
5	800
10	800
15	800
20	800
Total	**4000**

3. Cálculo de las cantidades de NaCl para preparación de las soluciones

$\mathrm{NaCl(\,g/l)} = \mathrm{CE\ (\,dS/m)} \times 0.64$ (Moliner Aramendia & Masaguer Rodríguez, 1996):

Donde;

$\mathrm{NaCl\ (g/l)} = \mathrm{Cantidad\ de\ Sal\ en\ gramos\ por\ litro}$

$\mathrm{CE\ (dS/m)} = \mathrm{Conductividad\ Electrica\ en\ decisiemens\ por\ metro}$

$0.64 = \mathrm{Factor\ de\ conversion}$

3.1. 800 ml de solución salina de CE 5 dS/m

$$\mathrm{NaCl(\,g/l)} = 5 \text{ x } 0.64$$

$$\boxed{NaCl(g/l) = 3.2\ gr\ de\ NaCl/l}$$

$$3.2\ gr\ de\ NaCl \rightarrow 1000\ ml$$

$$x\ gr\ de\ NaCl \rightarrow 800\ ml$$

$$\boxed{x = 2.56\ gr\ de\ NaCl}$$

diluir 2.56 gr de NaCl en 800 ml de agua destilada para lograr una solución con conductividad de 5 dS/m

3.2. 800 ml de solución salina de CE 10 dS/m

$$\mathrm{NaCl(\,g/l)} = 10 \text{ x } 0.64$$

$$\boxed{NaCl(g/l) = 6.4\ gr\ de\ NaCl/l}$$

$$6.4\ gr\ de\ NaCl \rightarrow 1000\ ml$$

$$x\ gr\ de\ NaCl \rightarrow 800\ ml$$

$$\boxed{x = 5.12\ gr\ de\ NaCl}$$

diluir 5.12 gr de NaCl en 800 ml de agua destilada para lograr una solución con conductividad de 10 dS/m

3.3. 800 ml de solución salina de CE 15 dS/m

$$\mathrm{NaCl(\,g/l)} = 15 \text{ x } 0.64$$

$$\boxed{NaCl(g/l) = 9.6\ gr\ de\ NaCl/l}$$

$$9.6\ gr\ de\ NaCl \quad \rightarrow \quad 1000\ ml$$

$$x\ gr\ de\ NaCl \quad \rightarrow \quad 800\ ml$$

$$\boxed{x = 7.68\ gr\ de\ NaCl}$$

diluir 7.68 gr de NaCl en 800 ml de agua destilada para lograr una solución con conductividad de 15 dS/m

3.4. 800 ml de solución salina de CE 20dS/m

$$\mathrm{NaCl(\,g/l)} = 20 \text{ x } 0.64$$

$$\boxed{NaCl(g/l) = 12.8\ gr\ de\ NaCl/l}$$

$$12.8\ gr\ de\ NaCl \quad \rightarrow \quad 1000\ ml$$

$$x\ gr\ de\ NaCl \quad \rightarrow \quad 800\ ml$$

$$\boxed{x = 10.24\ gr\ de\ NaCl}$$

diluir 10.24 gr de NaCl en 800 ml de agua destilada para lograr una solución con conductividad de 20 dS/m

4. Preparación de la solución de hipoclorito de sodio para desinfección de semillas

Concentración inicial (C_1): 4 % (lejía comercial)

Concentración final deseada (C_2): 2 %

Volumen final (V_2): 350 ml

Volumen a calcular: V_1 (lejía al 4 %)

Formula de dilución

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2$$

$$4 \times V_1 = 2 \times 350$$

$$V_1 = \frac{700}{4} = 175\ ml$$

$$\boxed{V_{agua} = 350 - 175 = 175\ ml}$$

Se preparó una solución de hipoclorito de sodio al 2 % mediante la dilución de 175 ml de lejía comercial al 4 % con 175 ml de agua destilada, obteniéndose un volumen final nominal de 350 ml. La solución preparada se utilizó inmediatamente para la desinfección de las semillas.

5. Preparación de la suspensión bacteriana por dilución.

suspensión madre de:

$C_1 = 1 \times 10^{11}$ UFC/ml

concentración teorica de:

$C_2 = 1 \times 10^{8}$ UFC/mL

La relación de dilución es:

$$\frac{10^{11}}{10^{8}} = 10^{3}$$

se necesitó diluir 1 ml de la suspensión madre 1×10^{11} UFC/ml en 1000 ml de agua destilada para lograr una dilución de suspensión bacteriana de 9.99×10^{7} UFC/ml ≈ 1×10^{8} UFC/ml.

ANEXO 4. EQUIVALENCIAS

Tabla 23.
Equivalencias prácticas para medir concentraciones de NaCl.

Unidad	Equivalencia aproximada
1 dS/m	640 ppm
1 dS/m	0.64 g/L NaCl
1 dS/m	10–11 mM NaCl
1 mM NaCl	≈ 0.09 dS/m
1 000 ppm	≈ 1.56 dS/m
5 dS/m	≈ −0.18 Ψo (MPa)

ANEXO 5. REGISTROS EXPERIMENTALES

Tabla 24.
Registros semanales de mediciones de Conductividad eléctrica en solución salina y saturación del sustrato de los tratamientos.

Tratamiento	sem 1		sem 2	sem 3	sem 4
	C.E. solución salina (dS/m)	C.E. del extracto del sustrato (dS/m)	C.E. del extracto del sustrato (dS/m)	C.E. del extracto del sustrato (dS/m)	C.E. del extracto del sustrato (dS/m)
T0a	0.054	0.084	0.080	0.079	0.080
T0b	0.047	0.072	0.076	0.079	0.074
T1	5.142	6.432	5.512	5.576	5.476
T2	5.203	5.944	5.463	6.452	5.620
T3	9.867	10.285	11.462	10.384	10.570
T4	10.098	11.172	10.480	10.289	11.314
T5	15.918	16.671	15.730	15.670	16.371
T6	16.230	16.463	15.823	15.845	16.276
T7	19.999	19.999	19.999	19.999	19.999
T8	19.999	19.999	19.999	19.999	19.999

Nota: las mediciones se realizaron con Conductímetro digital modelo EZ-9908; rango de C.E: 0 - 19990 us/cm; Exactitud de C.E: ±2%, Resolución de C.E: 1us/cm

ANEXO 6. REGISTROS FOTOGRÁFICOS DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Figura 13.

Horno de esterilización por calor seco, para esterilización de sustrato



Figura 14.

Sustrato esterilizado y almacenado



Figura 15.

Desinfeccion de semillas de arroz con hipoclorito de sodio al 2% durante 15 min.



Figura 16.

Desinfeccion de semillas de arroz con alcohol al 70 % durante 30 min.



Figura 17.

Secado de semillas de arroz posterior al proceso de desinfeccion



Figura 18.

Ordenacion de recipientes para prueba de germinacion



Figura 19.

Dosificacion de NaCl para preparacion de soluciones



Figura 20.

Adicion de sustrato en los recipientes



Figura 21.

Preparacion de la suspencion bacteriana.



Figura 22.

Dosificacion de la suspension bacteriana madre.



Figura 23.

Inoculacion de semillas de arroz



Figura 24.

Siembra en recipientes



Figura 25.

Distribucion de semillas sobre la superficie del sustrato



Figura 26.

Monitoreo de la conductividad electrica del medio

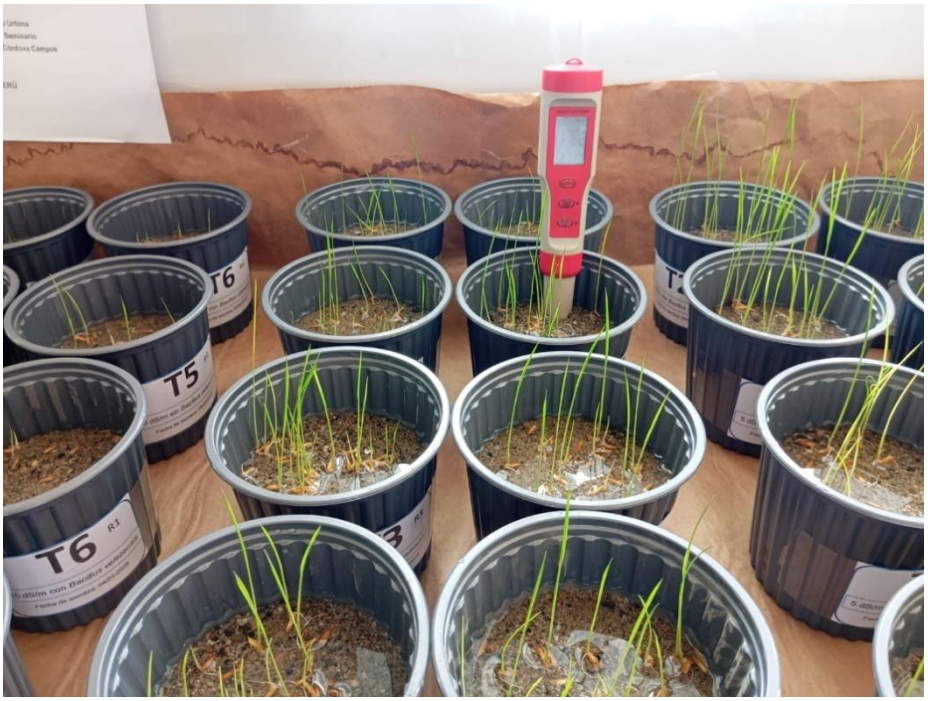


Figura 27.

Evaluacion final 26 dias despues de la siembra

