



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
CARRERA DE AGROPECUARIA**

**EVALUACIÓN AGRONÓMICA DE RIZOBACTERIAS
NATIVAS CON POTENCIAL PROMOTOR DEL
CRECIMIENTO VEGETAL EN EL CULTIVO DE RÁBANO
(*Raphanus sativus* L.)**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Requisito parcial para la obtención del título de:

INGENIERA AGROPECUARIA

Autor: Cristhy Tays Palma Panchana

LA LIBERTAD, AGOSTO 2026



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
CARRERA DE AGROPECUARIA

**EVALUACIÓN AGRONÓMICA DE RIZOBACTERIAS
NATIVAS CON POTENCIAL PROMOTOR DEL
CRECIMIENTO VEGETAL EN EL CULTIVO DE RÁBANO**
(Raphanus sativus L.)

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Requisito parcial para la obtención del título de:

INGENIERA AGROPECUARIA

Autor/a: Cristhy Tays Palma Panchana

Tutor/a: Blgo. Javier Oswaldo Soto Valenzuela, Ph.D.

LA LIBERTAD, AGOSTO 2026

TRIBUNAL DE GRADO

Trabajo de Integración Curricular presentado por **CRISTHY TAYS PALMA PANCHANA** como requisito parcial para la obtención del grado de Ingeniera Agropecuaria de la Carrera de Agropecuaria.

Trabajo de Integración Curricular **APROBADO** el: 11/08/2026



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**VERONICA CRISTINA
ANDRADE YUCAILLA**

Ing. Verónica Andrade Yucailla, PhD.
**DIRECTORA DE CARRERA
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**DANIEL ANTONIO
PONCE DE LEÓN LIMA**

Ing. Daniel Ponce de León Lima, PhD.
**PROFESOR ESPECIALISTA
MIEMBRO DEL TRIBUNAL**



Javier Oswaldo
Soto Valenzuela
Time Stamping
Security Data

Blgo. Javier Soto Valenzuela, PhD.
**PROFESOR TUTOR
MIEMBRO DEL TRIBUNAL**



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**NADIA ROSAURA
QUEVEDO PINOS**

Ing. Nadia Quevedo Pinos, PhD.
**PROFESORA GUÍA DE LA UIC
MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

Ing. Washinton Perero Vera, MSc.
ASISTENTE ADMINISTRATIVO



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**WASHINGTON VIDAL
PERERO VERA**

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis más sinceros agradecimientos a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, a la Facultad de Ciencias Agrarias y al Centro de Apoyo Colonche, por brindar las instalaciones y el apoyo para el desarrollo de esta investigación

Agradezco a mi tutor de tesis, Blgo. Javier Soto Valenzuela, por su orientación, conocimientos y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo, así como al personal que colaboraron en las actividades de campo y laboratorio.

Finalmente, expreso mis más profundos agradecimientos a Dios por concederme salud, fortaleza y sabiduría para superar cada desafío presente durante mi formación académica.

A mi familia, especialmente a mis padres Fernanda y Fernando, por su amor, apoyo incondicional, esfuerzo y confianza, a mis hermanos Stalyn, Mikaela, Melisa y Ulises que me sacaron una sonrisa en esos días malos. Gracias por ser mi familia y mi mayor motivación para alcanzar esta meta.

También agradezco a mis compañeros de laboratorio, que de una u otra manera, contribuyeron con su apoyo, consejos y palabras de aliento para hacer realidad este logro.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por guiar cada uno de mis pasos y darme la fortaleza necesaria para alcanzar esta meta.

Con todo mi amor, dedico este logro a la memoria de mi querido abuelito Félix, quien fue mi ángel guardián y una de las personas más importantes en mi vida. Aunque ya no esté físicamente para acompañarme en este momento tan especial, sé que desde el cielo cuida de mí y comparte la alegría de este logro. Me hubiera llenado de felicidad poder verlo sonreír y sentirse orgulloso de verme cumplir este sueño. Su amor, sus consejos, su ejemplo y los recuerdos que dejó en mi corazón serán siempre una guía en mi camino. Esta meta también es tuya, porque una parte de quien soy hoy lleva siempre tu esencia.

A mis padres Fernanda y Fernando por su amor, apoyo incondicional, sacrificio y confianza durante cada etapa de mi vida. Gracias por creer en mí, motivarme a seguir adelante y ser el pilar fundamental para alcanzar este logro. Todo lo que soy y cada uno de mis logros llevan una parte de ustedes. Quiero que se sientan orgullosos de mí, así como yo me siento profundamente orgullosa de ser su hija. Este logro también les pertenece, porque sin su amor, sus consejos y el inmenso esfuerzo que han hecho por mí, nada de esto habría sido posible. A mis hermanos Stalyn, gracias por ser un ejemplo de responsabilidad, esfuerzo y perseverancia. Tu apoyo, tus consejos y la confianza que siempre has depositado en mí han sido un impulso para seguir adelante y no rendirme ante las dificultades; Mikaela, Melisa y Ulises deseo que este logro les recuerde que con dedicación, perseverancia y Fé es posible alcanzar los sueños. Espero ser para ustedes un motivo de inspiración para nunca dejar de luchar por sus sueños y metas.

Finalmente, dedico este trabajo a alguien especial que ha estado a mi lado durante este proceso, brindándome su apoyo, comprensión y palabras de aliento, ha sido mi curita en los momentos más difíciles. Gracias por creer en mí, en cada uno de mis avances y recordarme que nunca debo rendirme. Tu compañía fue un impulso importante para llegar hasta aquí.

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto cepas nativas con potencial PGPR, Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal sobre el rendimiento del cultivo de rábano (*Raphanus sativus* L.) en condiciones de campo. El estudio se realizó en el Centro de Apoyo Colonche de la Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE); mediante un diseño de bloques completamente al azar con seis tratamientos y tres repeticiones. Los tratamientos incluyeron la aplicación individual de *Bacillus subtilis* y *Pantoea dispersa*, la combinación de ambas cepas, la aplicación de *Bacillus subtilis* junto con fertilización química y un tratamiento con fertilización química. Durante el desarrollo del cultivo se evaluaron variables como altura de planta y el número de hojas, mientras que en la cosecha se determinaron el diámetro y la longitud de la raíz comercial y el peso fresco.

Los resultados evidenciaron diferencias entre los tratamientos evaluados. El tratamiento conformado por *Bacillus subtilis* con la fertilización química presentó los mejores valores en peso fresco de la raíz y rendimiento comercial estimado, mientras que la combinación de *Bacillus subtilis* y *Pantoea dispersa* mostraron un comportamiento favorable frente a la aplicación individual de las cepas en varias de las variables analizadas. Estos resultados sugieren que la inoculación con bacterias tipo PGPR pueden contribuir al mejor desarrollo del cultivo cuando se integra con prácticas adecuadas de fertilización.

Palabras clave: Agricultura sostenible, *Bacillus subtilis*, inoculación bacteriana, *Pantoea dispersa*, PGPR, rábano

ABSTRACT

The present study aimed to evaluate the effect of native strains with PGPR potential (plant growth-promoting rhizobacteria) on the yield of radish (*Raphanus sativus* L.) under field conditions. The study was conducted at the Colonche Support Center of the Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE), using a completely randomized block design with six treatments and three replications. The treatments included the individual application of *Bacillus subtilis* and *Pantoea dispersa*, the combination of both strains, the application of *Bacillus subtilis* together with chemical fertilization, and a treatment with chemical fertilization alone. During crop development, variables such as plant height and number of leaves were evaluated, while at harvest, the diameter and length of the commercial root and fresh weight were determined.

The results showed differences among the evaluated treatments. The treatment consisting of *Bacillus subtilis* combined with chemical fertilization presented the highest values for root fresh weight and estimated commercial yield, while the combination of *Bacillus subtilis* and *Pantoea dispersa* showed favorable performance compared with the individual application of the strains in several of the variables analyzed. These results suggest that inoculation with PGPR-type bacteria may contribute to improved crop development when integrated with appropriate fertilization practices.

Keywords: Sustainable agriculture, *Bacillus subtilis*, bacterial inoculation, *Pantoea dispersa*, PGPR, radish.

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

El presente Trabajo de Integración Curricular titulado **EVALUACIÓN AGRONÓMICA DE RIZOBACTERIAS NATIVAS CON POTENCIAL PROMOTOR DEL CRECIMIENTO VEGETAL EN EL CULTIVO DE RÁBANO (*Raphanus sativus* L.)** y elaborado por **Cristhy Tays Palma Panchana**, declara que la concepción, análisis y resultados son originales y aportan a la actividad científica educativa agropecuaria.

Transferencia de derechos autorales.

"El contenido del presente Trabajo de Graduación es de mi responsabilidad; el patrimonio intelectual del mismo pertenece a la Universidad Estatal Península de Santa Elena".



Firma del estudiante

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
Problema Científico	2
Objetivos	2
Objetivo General:	2
Objetivos Específicos	2
CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
1.1 Sistemas de producción agropecuaria	3
1.2 Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal	5
1.3 Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en cultivos Brassicaceae.....	5
1.4 Aplicación de PGPR en el cultivo de rábano (<i>Raphanus sativus</i> L.).....	6
1.5 Importancia del rábano en sistemas hortícolas	7
1.6 Producción de fitohormonas por las PGPR.....	7
1.7 Mecanismos de acción de las rizobacterias.....	8
1.8 <i>Bacillus subtilis</i> como rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal.....	9
1.9 <i>Pantoea dispersa</i> como rizobacteria promotora del crecimiento vegetal.....	10
1.10 Rizobacterias y tolerancia a estrés abiótico.....	11
1.11 Impacto en la sostenibilidad agrícola	12
1.12 Solubilización de fósforo	13
1.13 Biofertilizantes basados en PGPR	14
1.14 Pertinencia del estudio en Ecuador	14
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
2.1 Caracterización del área	16
2.2 Materiales, equipos y reactivos	16
Material biológico	16
Equipos de laboratorio.....	17
Reactivos para medios de cultivo.....	17
2.3 Tipo de investigación	18
2.4 Diseño de investigación	18
2.5 Diseño experimental	18
2.6 Manejo del experimento.....	22
Sitios de muestreo	22

Preparación del suelo.....	22
Delimitaciones del terreno.....	22
Selección de cepas bacterianas	22
Reactivación y propagación bacteriana.....	23
Preparación de semillas e inoculación.....	24
Trasplante a campo	25
Segunda inoculación bacteriana.....	25
Plan de fertilización.....	27
Cálculo del nitrógeno	28
Cálculo del fósforo.....	28
Cálculo del fertilizante 8–20–20.....	29
Cálculo del sulfato de amonio	29
Conversión de la dosis al área experimental.....	29
Fertilizante 8–20–20	30
Sulfato de amonio	30
Manejo fitosanitario	31
Frecuencia de riego	31
2.7 Parámetros evaluados.....	31
Morfológicos	34
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
3.1 Altura de la planta	36
3.2 Número de hojas	38
3.3 Diámetro del tallo.....	40
3.4 Longitud de la raíz comercial	42
3.5 Peso fresco de la raíz comercial	44
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	46
Conclusiones	46
Recomendaciones	47
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
ANEXOS	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Delineamiento experimental	20
Tabla 2: Rizobacterias utilizadas en el experimento	23
Tabla 3: Total plan de fertilización	30
Tabla 4: Estimación del requerimiento hídrico del rábano.....	33
Tabla 5: Altura promedio de planta (cm) del cultivo de rábano (Raphanus sativus L.) durante las cinco semanas de evaluación.....	36
Tabla 6: Número promedio de hojas del cultivo de rábano (Raphanus sativus L.) bajo los diferentes tratamientos	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Vista satelital del Centro de Apoyo Colonche Google Earth 2016	16
Figura 2: Croquis del experimento en campo	21
Figura 3: Diámetro promedio de la raíz del cultivo de rábano bajo los diferentes tratamientos	40
Figura 4: Longitud promedio de la raíz del cultivo de rábano bajo los diferentes tratamientos	42
Figura 5: Peso fresco promedio de la raíz del cultivo de rábano bajo los diferentes tratamientos ...	44

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Tablas de análisis ANOVA.....	52
Anexo 2: Siembra de bacterias en cajas Petri	57
Anexo 3: Observación de crecimiento <i>Bacillus subtilis</i>	57
Anexo 4: Observación de crecimiento <i>Pantoea dispersa</i>	57
Anexo 5: Semillas inoculadas dentro de la incubadora.....	58
Anexo 6: Caldo de bacterias en tubos de cultivo para su multiplicación.....	58
Anexo 7: Germinación de semillas inoculadas	58
Anexo 8: Observación del crecimiento de plántulas	59
Anexo 9: Arado con mecanización.....	59
Anexo 10: Delimitando área del terreno.....	60
Anexo 11: Siembra de semillas.....	60
Anexo 12: Crecimiento de plantas de rábano	61
Anexo 13: Cosecha de rábanos	61

INTRODUCCIÓN

En Ecuador, la producción de hortalizas constituye una actividad importante para la seguridad alimentaria y la economía de pequeños y medianos agricultores. Entre estos cultivos, el rábano (*Raphanus sativus* L.) destaca por su corto ciclo de producción, facilidad de manejo y rápida comercialización, lo convierte en una alternativa para diversificar los sistemas productivos y generar ingresos en menor tiempo.

En la provincia de Santa Elena, la agricultura se desarrolla bajo condiciones caracterizadas por precipitaciones escasas, altas temperaturas y limitada disponibilidad de agua para riego, factores que representan un desafío para mantener la productividad de los cultivos. En este contexto, Holguín Alay (2021) señala que el rábano presenta una buena adaptación a las condiciones de la provincia y que su rendimiento puede mejorar mediante un manejo agronómico adecuado.

Como alternativa para fortalecer la producción agrícola de manera sostenible, las PGPR han despertado un creciente interés debido a su capacidad para favorecer el desarrollo de las plantas mediante mecanismos como la fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de fósforo, la producción de fitohormonas y el incremento en la disponibilidad de nutrientes (Backer et al., 2018).

En la provincia de Santa Elena, Soto-Valenzuela *et al.* (2016) demostraron que la inoculación con bacterias nativas mejoró el crecimiento del cultivo de maíz, mientras que Orrala (2025) identificó cepas de los géneros *Bacillus* y *Pantoea* con potencial para ser utilizadas como biofertilizantes en cultivos de la comuna Colonche.

A pesar de estos avances, en Ecuador aún existe poca información sobre el efecto de estas rizobacterias en cultivos hortícolas, particularmente en rábano. La mayoría de las investigaciones están enfocadas en la caracterización de cepas o en otros cultivos, por lo que se desconoce el comportamiento de *Bacillus subtilis*. y *Pantoea dispersa* aplicadas de forma individual, combinada o junto con fertilización química bajo las condiciones agroecológicas de Colonche.

Por ello, la presente investigación evaluó el efecto de dos rizobacterias autóctonas sobre el rendimiento del cultivo de rábano, con el propósito de generar evidencia científica que contribuya al desarrollo de alternativas biológicas orientadas a mejorar la productividad agrícola y promover sistemas de producción más sostenibles en la provincia de Santa Elena.

Problema Científico

En la provincia de Santa Elena existen microorganismos nativos con potencial PGPR, pero existe poca información sobre su comportamiento cuando son inoculados en cultivos agrícolas de importancia local.

Objetivos

Objetivo General:

- ❖ Evaluar el efecto de cepas nativas de *Bacillus subtilis* y *Pantoea dispersa*, aplicadas individualmente, en combinación y como complemento de la fertilización convencional, sobre el crecimiento y rendimiento del cultivo de rábano (*Raphanus sativus* L.) bajo condiciones de campo.

Objetivos Específicos:

1. Determinar el efecto de las cepas nativas de *Bacillus subtilis* y *Pantoea dispersa*, aplicadas individualmente y en combinación, sobre las variables de crecimiento del cultivo de rábano.
2. Determinar el efecto de los tratamientos con cepas nativas, individualmente y en combinación con la fertilización, sobre el rendimiento del cultivo de rábano.
3. Comparar el comportamiento agronómico de las cepas nativas, aplicadas individualmente, en combinación y como complemento de la fertilización convencional, para identificar el tratamiento con mayor respuesta productiva del cultivo de rábano.

H₀: Las diferentes estrategias de aplicación de las cepas nativas de *Bacillus subtilis* y *Pantoea dispersa*, aplicadas individualmente, en combinación y como complemento de la fertilización convencional, no producen diferencias significativas en las variables de crecimiento y rendimiento del cultivo de rábano (*Raphanus sativus* L.).

H₁: Las diferentes estrategias de aplicación de las cepas nativas de *Bacillus subtilis* y *Pantoea dispersa*, aplicadas individualmente, en combinación y como complemento de la fertilización convencional, producen diferencias significativas en las variables de crecimiento y rendimiento del cultivo de rábano (*Raphanus sativus* L.)

CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La producción hortícola desempeña un papel importante dentro de la agricultura debido a su contribución en la seguridad alimentaria y en la generación de ingresos para los productores. Sin embargo, el incremento de los costos de producción y la necesidad de reducir el impacto ambiental asociado al uso intensivo de fertilizantes químicos han impulsado la búsqueda de alternativas que mejoren la eficiencia de los sistemas agrícolas.

En este contexto, los microorganismos benéficos asociados a la rizósfera han despertado un creciente interés debido a su capacidad para favorecer el crecimiento y desarrollo de las plantas mediante diferentes mecanismos biológicos. Entre estos microorganismos se encuentran las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), las cuales pueden contribuir a una mejor disponibilidad de nutrientes, estimular el desarrollo radicular y favorecer el rendimiento de los cultivos (Backer et al., 2018).

El cultivo de rábano (*Raphanus sativus* L.) constituye una de las hortalizas de ciclo corto con mayor potencial para evaluar el efecto de microorganismos promotores del crecimiento, debido a que las respuestas fisiológicas y agronómicas pueden observarse en periodos relativamente cortos. Variables como altura de planta, número de hojas, longitud de raíz, peso fresco y diámetro de raíz permiten determinar la influencia de diferentes prácticas de manejo sobre el desarrollo del cultivo.

Por esta razón, resulta necesario revisar los principales aspectos relacionados con las PGPR, sus mecanismos de acción y su aplicación en cultivos hortícolas. En el presente capítulo se abordan conceptos relacionados con los sistemas de producción agropecuaria, las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, su aplicación en especies de la familia Brassicaceae y en el cultivo de rábano, así como los mecanismos biológicos que justifican su utilización como alternativa para mejorar la productividad agrícola.

1.1 *Sistemas de producción agropecuaria*

Los sistemas de producción agropecuaria en América Latina han transitado hacia modelos más diversificados, donde la integración de prácticas agroecológicas busca equilibrar productividad y conservación ambiental. Según Altieri y Nicholls (2017), la sostenibilidad de estos sistemas depende de la capacidad de los agricultores para incorporar

tecnologías biológicas que reduzcan el impacto de los fertilizantes sintéticos. En Ecuador, la producción hortícola se ha intensificado en zonas de la Costa y Sierra, generando la necesidad de alternativas que optimicen el rendimiento sin incrementar los costos de producción (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2021).

El rábano, aunque considerado un cultivo menor en comparación con otros tubérculos y hortalizas, posee relevancia económica en mercados locales y regionales. Su rápido ciclo de crecimiento lo convierte en un cultivo estratégico para evaluar tecnologías de biofertilización, especialmente en sistemas de pequeña escala donde los márgenes de rentabilidad son reducidos (González et al., 2020). Los sistemas de producción agropecuaria comprenden el conjunto de actividades, recursos y tecnologías empleadas para la obtención de productos de origen vegetal y animal. Estos sistemas integran componentes biológicos, económicos y ambientales que interactúan entre sí para garantizar la producción de alimentos y materias primas destinadas al consumo humano y a diferentes sectores productivos.

Durante las últimas décadas, el incremento de la demanda de alimentos ha impulsado la intensificación de la agricultura mediante el uso de fertilizantes sintéticos, plaguicidas y otras prácticas orientadas a maximizar el rendimiento de los cultivos. Si bien estas estrategias contribuyen al aumento de la productividad agrícola, también generan preocupaciones con la degradación de los suelos, la contaminación ambiental y la disminución de la biodiversidad microbiana en los agroecosistemas (Tilman et al., 2002).

Frente a esta situación, la agricultura moderna ha mostrado un creciente interés en el desarrollo de sistemas de producción más sostenibles que permitan mantener la productividad sin comprometer la conservación de los recursos naturales. En este contexto, los microorganismos benéficos asociados a la rizósfera han adquirido relevancia debido a su capacidad para mejorar la disponibilidad de nutrientes y favorecer el crecimiento de los cultivos mediante procesos biológicos naturales (Backer et al., 2018).

En cultivos hortícolas de importancia económica, como el rábano y la incorporación de tecnologías basadas en PGPR representan una alternativa que podría contribuir a mejorar la eficiencia productiva y reducir parcialmente la dependencia de insumos químicos convencionales.

1.2 *Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal*

Las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, conocidas como PGPR por sus siglas en inglés (*Plant Growth-Promoting Rhizobacteria*), corresponden a un grupo de microorganismos que habitan en la rizósfera y establecen relaciones beneficiosas con las plantas. Estas bacterias pueden colonizar la superficie de las raíces o desarrollarse en su entorno inmediato, contribuyendo al crecimiento vegetal mediante diversos mecanismos biológicos (Vejan et al., 2016).

El interés por las PGPR ha aumentado considerablemente debido a su potencial para mejorar la nutrición de los cultivos y reducir la dependencia de fertilizantes químicos. Entre los géneros más estudiados se encuentran *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Rhizobium* y *Pantoea*, los cuales han demostrado efectos positivos en diferentes especies agrícolas y hortícolas (Backer et al., 2018).

Los beneficios asociados a estas bacterias incluyen la producción de fitohormonas, la fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de fósforo, la producción de sideróforos y la inducción de mecanismos de defensa en las plantas. Como resultado, las especies inoculadas suelen presentar un mejor desarrollo radicular, mayor absorción de nutrientes y un crecimiento más vigoroso en comparación con plantas no inoculadas (Vejan et al., 2016).

Actualmente, las PGPR se consideran una herramienta de interés para el desarrollo de sistemas agrícolas sostenibles debido a su capacidad para mejorar la productividad mediante procesos biológicos naturales. En este sentido, la evaluación de cepas bacterianas con potencial biofertilizante constituye una línea de investigación relevante para cultivos hortícolas como el rábano, donde pequeñas variaciones en la disponibilidad de nutrientes pueden influir significativamente en el rendimiento final del cultivo.

1.3 *Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en cultivos Brassicaceae*

Diversos estudios realizados en cultivos agrícolas de la familia Brassicaceae han demostrado que la inoculación con PGPR puede influir positivamente en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Géneros como *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Azospirillum* han sido evaluados en especies como brócoli, coliflor y repollo, obteniéndose mejoras en variables relacionadas con el desarrollo radicular y la producción de biomasa (Aloo et al., 2023).

Estos resultados son de interés para el cultivo de rábano debido a que pertenece a la misma familia botánica y comparte características fisiológicas similares. Además, al tratarse de una hortaliza de ciclo corto, cualquier mejora en la disponibilidad de nutrientes durante las primeras etapas de crecimiento puede reflejarse en el tamaño de la raíz y en el rendimiento final del cultivo.

Acurio Vásquez *et al.* (2020) reportaron respuestas favorables en cultivos hortícolas inoculados con *Bacillus subtilis*, observando incremento en el crecimiento vegetativo respecto al tratamiento sin inoculación. Los autores señalan que este comportamiento podría estar relacionado con una mejor disponibilidad de nutrientes en la rizósfera y con la producción de compuestos que estimulan el desarrollo vegetal.

1.4 Aplicación de PGPR en el cultivo de rábano (*Raphanus sativus* L.)

Raphanus sativus es una hortaliza de ciclo corto ampliamente cultivada debido a su rápido crecimiento y a la facilidad con la que responde a cambios en las condiciones de manejo agronómico. Estas características han permitido que sea utilizado frecuentemente como especie modelo en investigaciones relacionadas con microorganismos promotores del crecimiento vegetal.

Entre los principales beneficios reportados por la inoculación con PGPR en rábano se encuentran el aumento de la longitud radicular, el incremento de biomasa fresca y una mayor tolerancia frente a condiciones ambientales desfavorables. Estos efectos están asociados a la capacidad de determinadas bacterias para producir fitohormonas, mejorar la disponibilidad de nutrientes y estimular el desarrollo del sistema radicular.

Flores Clavo *et al.* (2023) evaluaron rizobacterias aisladas de *Prosopis limensis* en plantas de rábano sometidas a condiciones de salinidad y encontraron incrementos significativos en la germinación, crecimiento radicular y desarrollo general de las plantas. Los autores señalaron que las cepas evaluadas presentaban capacidad de producir ácido indolacético, solubilizar fósforo y expresar actividad ACC desaminasa, características relacionadas con la promoción del crecimiento vegetal.

De manera similar, Khan *et al.* (2020) reportaron que la inoculación con bacterias promotoras del crecimiento permitió reducir los efectos negativos ocasionados por la

aplicación de fungicidas en rábano blanco (*Raphanus sativus* var. *longipinnatus*). Las plantas inoculadas presentaron mayor contenido de clorofila, mejor crecimiento vegetativo y una mayor acumulación de biomasa en comparación con los tratamientos sin inoculación.

Los resultados obtenidos en estas investigaciones respaldan el uso de PGPR en cultivos de rábano y constituyen antecedentes relevantes para la presente investigación, en la cual se evalúa el efecto de cepas bacterianas sobre variables agronómicas relacionadas con el rendimiento del cultivo.

1.5 Importancia del rábano en sistemas hortícolas

Desde el punto de vista agronómico, el rábano constituye una especie de interés para investigaciones relacionadas con nutrición vegetal y biofertilización, debido a que las respuestas a los tratamientos suelen manifestarse rápidamente en variables de crecimiento y rendimiento. Características como altura de planta, número de hojas, longitud de raíz, peso fresco y diámetro de la raíz pueden evaluarse en un periodo corto, permitiendo determinar con mayor precisión la eficacia de tecnologías orientadas al mejoramiento de la producción.

Aunque el cultivo presenta una buena adaptación a diferentes condiciones ambientales, su rendimiento puede verse afectado por limitaciones nutricionales, baja disponibilidad de fósforo y condiciones de estrés abiótico. Por esta razón, la incorporación de microorganismos benéficos ha despertado interés como una alternativa para mejorar el aprovechamiento de nutrientes y favorecer el crecimiento de las plantas.

Según Carvajal-Muñoz y Carmona-García (2012), el uso de microorganismos PGPR en cultivos hortícolas puede contribuir a mejorar la eficiencia en la absorción de nutrientes y reducir la dependencia de fertilizantes químicos. En el caso del rábano, estos beneficios pueden reflejarse directamente en el desarrollo de la raíz, que constituye el principal órgano de interés comercial.

1.6 Producción de fitohormonas por las PGPR

Uno de los mecanismos más estudiados en las PGPR es la capacidad de producir compuestos que intervienen en el desarrollo de las plantas. Entre estos compuestos destacan las fitohormonas, sustancias que regulan diversos procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento y formación de tejidos vegetales.

Dentro de las fitohormonas producidas por las PGPR, el ácido indolacético (AIA) es una de las más importantes debido a su influencia sobre el desarrollo radicular. La producción de esta hormona favorece la formación de raíces laterales y pelos absorbentes, aumentando la superficie de exploración del suelo y facilitando la absorción de agua y nutrientes (Glick, 2014).

Además del AIA, algunas bacterias también son capaces de producir giberelinas y citoquininas. Las giberelinas participan en procesos relacionados con la elongación celular y el crecimiento vegetativo, mientras que las citoquininas intervienen en la división celular y el desarrollo de nuevos tejidos. Como resultado, las plantas inoculadas pueden presentar un mayor crecimiento foliar y un mejor desarrollo general en comparación con plantas no inoculadas.

La producción de fitohormonas adquiere especial importancia en investigaciones orientadas al uso de PGPR como biofertilizantes. En la presente investigación, este mecanismo resulta relevante debido a que las cepas evaluadas podrían influir directamente sobre variables como altura de planta, número de hojas, longitud de raíz y peso fresco del rábano. Por esta razón, la síntesis de fitohormonas es considerada uno de los procesos biológicos que podrían explicar posibles diferencias entre tratamientos.

Posada *et al.* (2021) señalan que, la producción de fitohormonas constituye uno de los principales mecanismos mediante los cuales las PGPR promueven el crecimiento vegetal. Asimismo, Glick (2014) destaca que este proceso suele actuar de manera conjunta con otros mecanismos, como la solubilización de nutrientes y la reducción del estrés fisiológico, potenciando la respuesta de las plantas inoculadas.

1.7 Mecanismos de acción de las rizobacterias

Las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal ejercen su efecto mediante diferentes mecanismos biológicos que contribuyen al desarrollo de las plantas y a una mayor eficiencia en el aprovechamiento de los nutrientes disponibles en el suelo. Estos mecanismos pueden actuar de forma independiente o complementaria, dependiendo de las características de la cepa bacteriana y de las condiciones del cultivo.

Uno de los mecanismos más importantes es la fijación biológica de nitrógeno, proceso mediante el cual ciertas bacterias transforman el nitrógeno atmosférico en formas que pueden ser utilizadas por las plantas. Asimismo, algunas PGPR poseen la capacidad de solubilizar fósforo y otros nutrientes poco disponibles en el suelo, facilitando su absorción por el sistema radicular (Backer et al., 2018).

Otro mecanismo de interés es la producción de sideróforos, compuestos capaces de captar hierro del suelo y ponerlo a disposición de las plantas. Esta capacidad resulta beneficiosa debido a que el hierro participa en procesos fisiológicos relacionados con la fotosíntesis y el metabolismo vegetal. Además, los sideróforos pueden limitar el crecimiento de ciertos microorganismos fitopatógenos al reducir la disponibilidad de este elemento en la rizósfera.

Las PGPR también participan en procesos de control biológico mediante la producción de sustancias antimicrobianas y la activación de mecanismos naturales de defensa en las plantas. Estas características han despertado interés en la agricultura sostenible debido a que permiten disminuir parcialmente la dependencia de productos químicos utilizados para el control de enfermedades.

Considerando que, en este trabajo se evalúa el efecto de cepas rizobacterianas autóctonas sobre el cultivo de rábano, es importante comprender que los posibles cambios observados en las variables agronómicas pueden estar asociados a la acción conjunta de varios de estos mecanismos y no únicamente a un solo proceso biológico.

1.8 *Bacillus subtilis* como rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal

Las bacterias pertenecientes al género *Bacillus* constituyen uno de los grupos de microorganismos más utilizados en programas de biofertilización debido a su capacidad para colonizar la rizósfera y promover el crecimiento vegetal mediante diversos mecanismos biológicos. Una de sus principales ventajas radica en la formación de endosporas, estructuras que les permiten sobrevivir bajo condiciones ambientales adversas y mantener su viabilidad durante el almacenamiento y aplicación en campo (Gouda et al., 2018).

Diversas especies de *Bacillus* han demostrado capacidad para producir fitohormonas como el AIA, favorecer la solubilización de fósforo y sintetizar compuestos

que mejoran la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Como consecuencia, las plantas inoculadas suelen presentar un mayor desarrollo radicular, mejor crecimiento vegetativo y una mayor eficiencia en la absorción de nutrientes (Backer et al., 2018).

Además de su papel en la nutrición vegetal, algunas especies de *Bacillus* participan en mecanismos de control biológico mediante la producción de metabolitos con actividad antagonista frente a microorganismos fitopatógenos. Esta característica ha favorecido su incorporación en formulaciones comerciales utilizadas en diferentes sistemas agrícolas (Gouda et al., 2018).

En cultivos hortícolas, la inoculación con cepas de *Bacillus subtilis*. ha mostrado resultados favorables en variables relacionadas con crecimiento y rendimiento. Debido a estas características, este género bacteriano ha sido ampliamente estudiado como una alternativa para complementar los programas convencionales de fertilización y mejorar la sostenibilidad de los sistemas productivos.

1.9 *Pantoea dispersa* como rizobacteria promotora del crecimiento vegetal

Pantoea dispersa es una bacteria perteneciente a la familia Erwiniaceae que ha despertado interés en el ámbito agrícola debido a su potencial como microorganismo promotor del crecimiento vegetal. Esta especie puede establecer asociaciones beneficiosas con las raíces de diferentes cultivos y contribuir al desarrollo de las plantas mediante diversos mecanismos fisiológicos.

Investigaciones recientes han demostrado que cepas de *P. dispersa* poseen la capacidad de producir ácido indolacético, solubilizar fósforo y favorecer la disponibilidad de nutrientes en la rizósfera. Estas características pueden traducirse en una mayor formación de raíces, mejor absorción de nutrientes y un crecimiento más vigoroso de las plantas inoculadas (Suman et al., 2016).

Asimismo, se ha reportado que algunas cepas de este microorganismo presentan actividad antagonista frente a determinados patógenos vegetales, lo que incrementa su interés como herramienta biológica para la agricultura sostenible. Debido a su versatilidad funcional, especies del género *Pantoea* han sido evaluadas en diversos cultivos agrícolas con

resultados favorables en variables relacionadas con crecimiento y productividad (Dastogeer et al., 2022).

Aunque las investigaciones sobre *P. dispersa* son menos numerosas en comparación con otros géneros bacterianos como *Bacillus* o *Pseudomonas*, los antecedentes disponibles sugieren que esta bacteria posee características que podrían favorecer el crecimiento y rendimiento de cultivos hortícolas. Por esta razón, resulta de interés evaluar su comportamiento en el cultivo de rábano bajo las condiciones de la presente investigación.

1.10 *Rizobacterias y tolerancia a estrés abiótico*

El estrés abiótico constituye uno de los principales factores que limitan la producción agrícola a nivel mundial. Condiciones como sequía, salinidad, temperaturas extremas y baja disponibilidad de nutrientes pueden afectar el crecimiento de las plantas y reducir significativamente el rendimiento de los cultivos. En especies hortícolas de ciclo corto, estos efectos suelen manifestarse rápidamente debido a la alta demanda fisiológica durante las etapas iniciales de desarrollo.

Diversas investigaciones han demostrado que las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal pueden contribuir a disminuir los efectos negativos ocasionados por condiciones adversas del ambiente. Este efecto se atribuye a diferentes mecanismos fisiológicos, entre ellos la regulación hormonal, la mejora en la absorción de nutrientes y la producción de enzimas relacionadas con la respuesta al estrés (Nadeem et al., 2014).

Flores Clavo *et al.* (2023) evaluaron el comportamiento de plantas de rábano sometidas a condiciones de salinidad e inoculadas con diferentes rizobacterias, observando mejoras significativas en germinación, crecimiento radicular y supervivencia de las plantas. Los autores señalaron que las cepas evaluadas presentaban características funcionales que favorecieron la adaptación del cultivo a condiciones restrictivas.

Resultados similares fueron reportados por Khan *et al.* (2020), quienes observaron que determinadas PGPR permitieron reducir alteraciones fisiológicas causadas por fungicidas en plantas de rábano. Las plantas inoculadas mostraron una mejor respuesta vegetativa y una mayor acumulación de biomasa respecto a los tratamientos sin inoculación.

Estos antecedentes indican que las PGPR no solamente participan en la nutrición vegetal, sino que también pueden favorecer la adaptación de las plantas frente a condiciones ambientales desfavorables, contribuyendo a mantener el crecimiento y productividad de los cultivos.

1.11 *Impacto en la sostenibilidad agrícola*

La búsqueda de sistemas de producción más sostenibles ha impulsado el desarrollo de tecnologías orientadas a disminuir la dependencia de insumos químicos y mejorar la eficiencia en el uso de los recursos naturales. Dentro de estas alternativas, las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal han adquirido importancia debido a su capacidad para favorecer el crecimiento de los cultivos mediante procesos biológicos naturales.

La utilización de PGPR puede contribuir a reducir parcialmente el uso de fertilizantes químicos, ya que algunas cepas presentan la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico, solubilizar fósforo y mejorar la disponibilidad de otros nutrientes esenciales para las plantas. Como consecuencia, es posible optimizar el aprovechamiento de los recursos del suelo y disminuir los costos asociados a la fertilización convencional (Bashan y de-Bashan, 2020).

Además de los beneficios productivos, el uso de microorganismos benéficos puede favorecer la conservación de la calidad del suelo al estimular la actividad microbiana y contribuir al mantenimiento de procesos biológicos importantes para los agroecosistemas. Estos aspectos resultan especialmente relevantes en sistemas hortícolas donde la intensificación del manejo agrícola suele incrementar el uso de fertilizantes y otros insumos químicos.

En Ecuador, el interés por la implementación de tecnologías basadas en microorganismos ha aumentado debido a la necesidad de desarrollar sistemas productivos más eficientes y sostenibles. En este contexto, la evaluación de cepas bacterianas con potencial biofertilizante representa una alternativa que podría contribuir a mejorar la productividad agrícola sin comprometer la conservación de los recursos naturales.

Por lo tanto, el uso de PGPR en cultivos hortícolas como el rábano no solo puede generar beneficios relacionados con el rendimiento del cultivo, sino también aportar al

desarrollo de estrategias de producción más sostenibles y compatibles con los principios de la agricultura moderna.

1.12 Solubilización de fósforo

El fósforo es uno de los nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que participa en procesos relacionados con la transferencia de energía, división celular, desarrollo radicular y formación de tejidos vegetales. Sin embargo, una gran proporción del fósforo presente en los suelos agrícolas se encuentra en formas insolubles que no pueden ser aprovechadas directamente por las plantas.

Diversas rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal poseen la capacidad de transformar compuestos fosfatados insolubles en formas disponibles para la absorción radicular. Este proceso ocurre principalmente mediante la producción de ácidos orgánicos y enzimas fosfatasas que favorecen la liberación del fósforo retenido en el suelo (Sharma et al., 2013).

Entre los géneros bacterianos con mayor capacidad de solubilización de fósforo destacan *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Pantoea*. Estas bacterias han sido ampliamente estudiadas debido a su potencial para mejorar la nutrición vegetal y aumentar el rendimiento de diferentes cultivos agrícolas (Alori et al., 2017). La importancia de este mecanismo radica en que una mayor disponibilidad de fósforo favorece el desarrollo del sistema radicular, incrementa la absorción de otros nutrientes y mejora el crecimiento general de la planta.

En el cultivo de rábano, donde el desarrollo de la raíz constituye el principal objetivo productivo, la disponibilidad adecuada de fósforo resulta fundamental durante las primeras etapas de crecimiento. Por esta razón, la capacidad de determinadas PGPR para solubilizar este nutriente podría influir directamente sobre variables como longitud radicular, diámetro de raíz y peso fresco, aspectos que son evaluados en la presente investigación.

La utilización de bacterias solubilizadoras de fósforo representa además una alternativa para reducir parcialmente el uso de fertilizantes químicos fosfatados, contribuyendo al desarrollo de sistemas agrícolas más eficientes y sostenibles.

1.13 Biofertilizantes basados en PGPR

Los biofertilizantes son productos que contienen microorganismos vivos capaces de colonizar la rizósfera o el interior de las plantas, promoviendo el crecimiento vegetal mediante mecanismos biológicos como la fijación de nitrógeno, la solubilización de fósforo, la producción de fitohormonas y la protección frente a microorganismos patógenos (Mahanty et al., 2017).

Actualmente existen diversos biofertilizantes comerciales formulados a partir de bacterias pertenecientes a los géneros *Bacillus*, *Azospirillum*, *Pseudomonas* y *Rhizobium*, los cuales han demostrado incrementar la productividad agrícola y mejorar la salud del suelo. La aplicación de estos productos permite reducir parcialmente el uso de fertilizantes químicos, disminuyendo los costos de producción y los impactos ambientales asociados a la agricultura convencional (Mahanty et al., 2017).

El desarrollo de biofertilizantes basados en PGPR constituye una de las estrategias más prometedoras para la agricultura sostenible por su capacidad de mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes y aumentar el rendimiento de los cultivos bajo diferentes condiciones edafoclimáticas (Chaudhary et al., 2022). Por esta razón, la evaluación de nuevas cepas bacterianas adaptadas a las condiciones locales representa una alternativa de gran interés para el sector agrícola ecuatoriano.

1.14 Pertinencia del estudio en Ecuador

La agricultura ecuatoriana enfrenta actualmente desafíos relacionados con la disminución de la fertilidad de los suelos, el incremento en los costos de producción y la necesidad de adoptar prácticas más sostenibles. En este contexto, el uso de microorganismos promotores del crecimiento vegetal ha despertado interés como una alternativa para complementar los programas convencionales de fertilización y mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes.

Diversas investigaciones desarrolladas en Ecuador han demostrado el potencial de las PGPR en cultivos de importancia agrícola. Acurio *et al.* (2020) reportaron respuestas favorables en cultivos hortícolas inoculados con *Bacillus subtilis*, observando mejoras en variables relacionadas con el crecimiento vegetal. Estos resultados evidencian que el uso de

microorganismos benéficos puede constituir una herramienta útil para fortalecer la productividad agrícola bajo condiciones locales.

A pesar de los avances registrados, todavía existe información limitada sobre el comportamiento de cepas bacterianas específicas autóctonas en el cultivo de rábano. Esta situación justifica la necesidad de desarrollar investigaciones que permitan determinar la respuesta del cultivo frente a la inoculación de microorganismos con potencial biofertilizante.

Debido a su corto ciclo productivo y a la facilidad para evaluar variables relacionadas con crecimiento y rendimiento, el rábano representa una especie adecuada para estudiar el efecto de las PGPR bajo condiciones edafoclimáticas de la provincia de Santa Elena. Los resultados obtenidos podrían servir como base para futuras investigaciones orientadas al uso de biofertilizantes en sistemas hortícolas de la región.

En este contexto, la presente investigación busca generar información científica sobre el efecto de la inoculación de cepas bacterianas autóctonas en el rendimiento del cultivo de rábano, contribuyendo al desarrollo de alternativas tecnológicas que favorezcan una agricultura más sostenible y eficiente en Ecuador.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Caracterización del área

El estudio se llevó a cabo en la provincia de Santa Elena, en el Centro de Apoyo Colonche (UPSE), ubicado a 21 m s. n. m., en las coordenadas geográficas 2°02'22,91'' de latitud sur y 80°36'45,05'' de longitud oeste. El área de estudio presenta una precipitación anual comprendida entre 125 y 250 mm, de acuerdo con la información oficial del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), mientras que la ubicación geográfica y la altitud fueron obtenidas mediante el Geoportal del Instituto Geográfico Militar (IGM) (Instituto Geográfico Militar, s. f.; Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, s. f.).

2.2 Materiales, equipos y reactivos

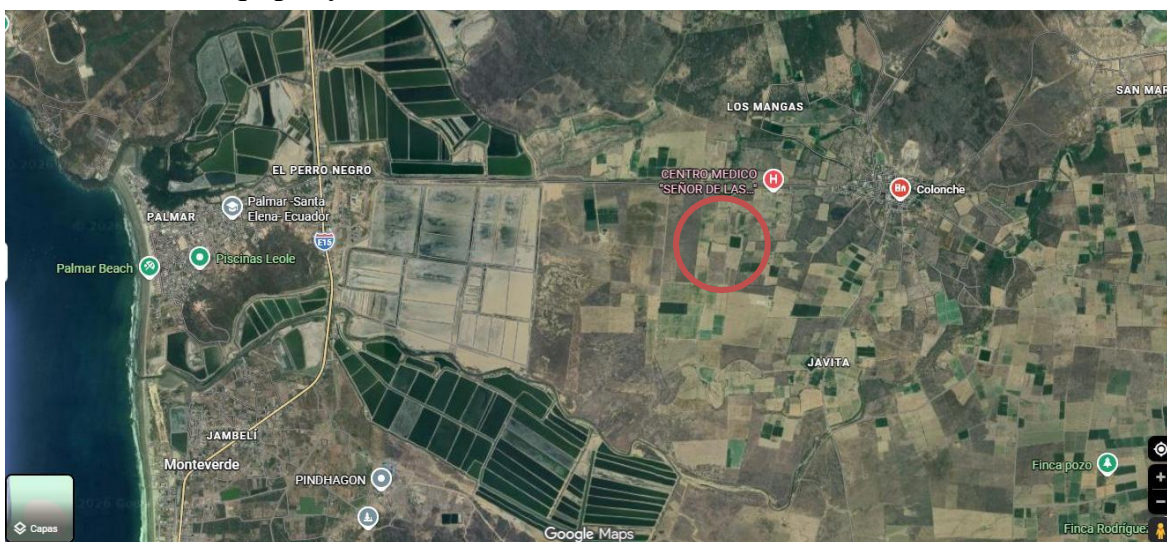


Ilustración 1: Vista satelital del lugar del experimento (Google Earth).

Material biológico

El material biológico estuvo constituido por las cepas nativas de *Bacillus subtilis* y *Pantoea dispersa*, pertenecientes a la colección de microorganismos del Centro de Investigaciones Biotecnológicas de la Universidad Estatal Península de Santa Elena (CEB-UPSE). La identificación molecular de las cepas se realizó mediante amplificación y secuenciación del gen que codifica el ARN ribosomal 16S (16S ARNr). Las secuencias obtenidas fueron sometidas a un análisis de similitud mediante BLASTn (Basic Local Alignment Search Tool for nucleotides) del National Center for Biotechnology Information (NCBI), utilizando las bases de datos de secuencias de nucleótidos, incluyendo GenBank. La identificación taxonómica se estableció con base en el porcentaje de identidad, cobertura

de la secuencia y valor de E (E-value) obtenidos en los alineamientos con secuencias de referencia.

- Micropipetas de 200µl
- Puntas de micropipetas de 200µl
- Cajas Petri de plástico
- Papel toalla
- Contenedores desechables (bandeja)
- Espátula
- Guantes de nitrilo
- Mascarilla
- Parafilm
- Papel aluminio
- Mechero de alcohol
- Semillas de cultivos vegetal (rábano)
- Beakers 250 mL y 500 mL
- Matraz Erlenmeyer 500mL
- Probeta 100 mL
- Alcohol
- Agua destilada
- Pinzas
- Tubos de cultivos

Equipos de laboratorio

- Balanza analítica
- Autoclave
- Cámara de flujo laminar
- Incubadora
- Refrigeradora

Reactivos para medios de cultivo

- Medio de cultivo (LMARC, con rojo congo)

- Medio líquido de crecimiento bacteriano (LMAR o YEM)
- Cloruro de Sodio
- Sulfato de magnesio
- Fosfato de potasio
- Solución de sacarosa
- Rojo Congo
- Agar

2.3 Tipo de investigación

Método de investigación es experimental. Esto se alinea con un enfoque cuantitativo, ya que la investigación experimental a menudo implica la recopilación y el análisis de datos numéricos para determinar relaciones de causa y efecto entre variables.

La investigación experimental está integrada por un conjunto de actividades metódicas y técnicas que se realizan para recabar la información y datos necesarios sobre el tema a investigar y el problema a resolver (Ruiz, 2019).

2.4 Diseño de investigación

A fin de valorar el efecto que produce la inoculación de rizobacterias sobre el rendimiento del rábano se llevó a cabo un diseño de bloques completamente al azar (DBCA) porque permite manejar la heterogeneidad del suelo y otras condiciones ambientales que pueden afectar el crecimiento de las plantas. Para determinarlo se dividió el campo experimental en 3 bloques, cada uno con 6 tratamientos con un total de 18 parcelas y se aleatorizó la asignación de estas dentro de campo, para aislar los efectos de las rizobacterias, y así obtener resultados más confiables.

2.5 *Diseño experimental*

El DBCA permite la manipulación de la variable independiente (cepas de rizobacterias), para evaluar su efecto sobre la variable dependiente (rendimiento del rábano).

El criterio de bloqueo estuvo determinado por la heterogeneidad del suelo dentro del área experimental, considerando que, aun cuando las parcelas pertenecían a un mismo lote, podían presentarse pequeñas variaciones en la fertilidad, textura, contenido de humedad y otras propiedades edáficas que influyen en el crecimiento del cultivo. La conformación de

los bloques permitió agrupar unidades experimentales con condiciones similares, reduciendo el error experimental y aumentando la precisión del análisis estadístico.

De acuerdo con Gómez y Gómez (1984), el DBCA es uno de los diseños más utilizados en experimentos agrícolas cuando existe variabilidad en el terreno, ya que permite controlar parte de esa variación mediante la formación de bloques homogéneos. Asimismo, Montgomery (2020) señala que este diseño incrementa la precisión en la comparación de tratamientos al disminuir la influencia de factores no controlados asociados al ambiente experimental. El experimento se estableció bajo un DBCA, con seis tratamientos y las repeticiones correspondientes. Para el análisis de las variables evaluadas se empleará el siguiente modelo aditivo lineal: $Y_{ij} = \mu + T_i + B_j + \varepsilon_{ij}$, donde:

- Y_{ij} : representa el valor observado de la variable respuesta correspondiente al i-ésimo tratamiento y j-ésimo bloque.
- μ : corresponde a la media general del experimento.
- T_i : representa el efecto del i-ésimo tratamiento.
- B_j : representa el efecto del j-ésimo bloque.
- ε_{ij} : corresponde al error experimental aleatorio asociado a cada observación, el cual se asume independiente, normalmente distribuido con media igual a 0 y varianza constante.

Los datos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) para determinar diferencias estadísticas entre tratamientos. Cuando se detecten diferencias significativas ($p \leq 0,05$), se aplicará la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey al 5 % de probabilidad, utilizando el software estadístico Infostat. Los tratamientos evaluados fueron los siguientes:

- T0: Control absoluto (sin inoculación)
- T1: Inoculación con *Bacillus subtilis*.
- T2: Inoculación con *Pantoea dispersa*
- T3: Inoculación con *Bacillus subtilis*. + *Pantoea dispersa*
- T4: Combinación de cepa *Bacillus subtilis*. + Fertilizante
- T5: Fertilizante

Las semillas de rábano fueron inoculadas mediante el método de suspensión antes de la siembra. Cada tratamiento se repitió tres veces, conformando un total de 18 unidades experimentales. En cada parcela se seleccionaron aleatoriamente 12 plantas de la zona útil, evitando las plantas ubicadas en los bordes, para realizar las mediciones de las variables agronómicas. Las plantas seleccionadas fueron consideradas submuestras de cada parcela; por tanto, la parcela constituyó la unidad experimental y las tres parcelas correspondientes a cada tratamiento representaron las repeticiones del experimento.

Tabla 1: Delineamiento experimental

DELINEAMIENTO EXPERIMENTAL	MEDIDAS
Área total del experimento	124,875 m ²
Área útil de evaluación	47.25 m ²
Unidades experimentales	18
Número de repeticiones	3
Número de tratamientos	6
Plantas por tratamiento	90
Plantas por parcela	30
Plantas para evaluar en campo	12

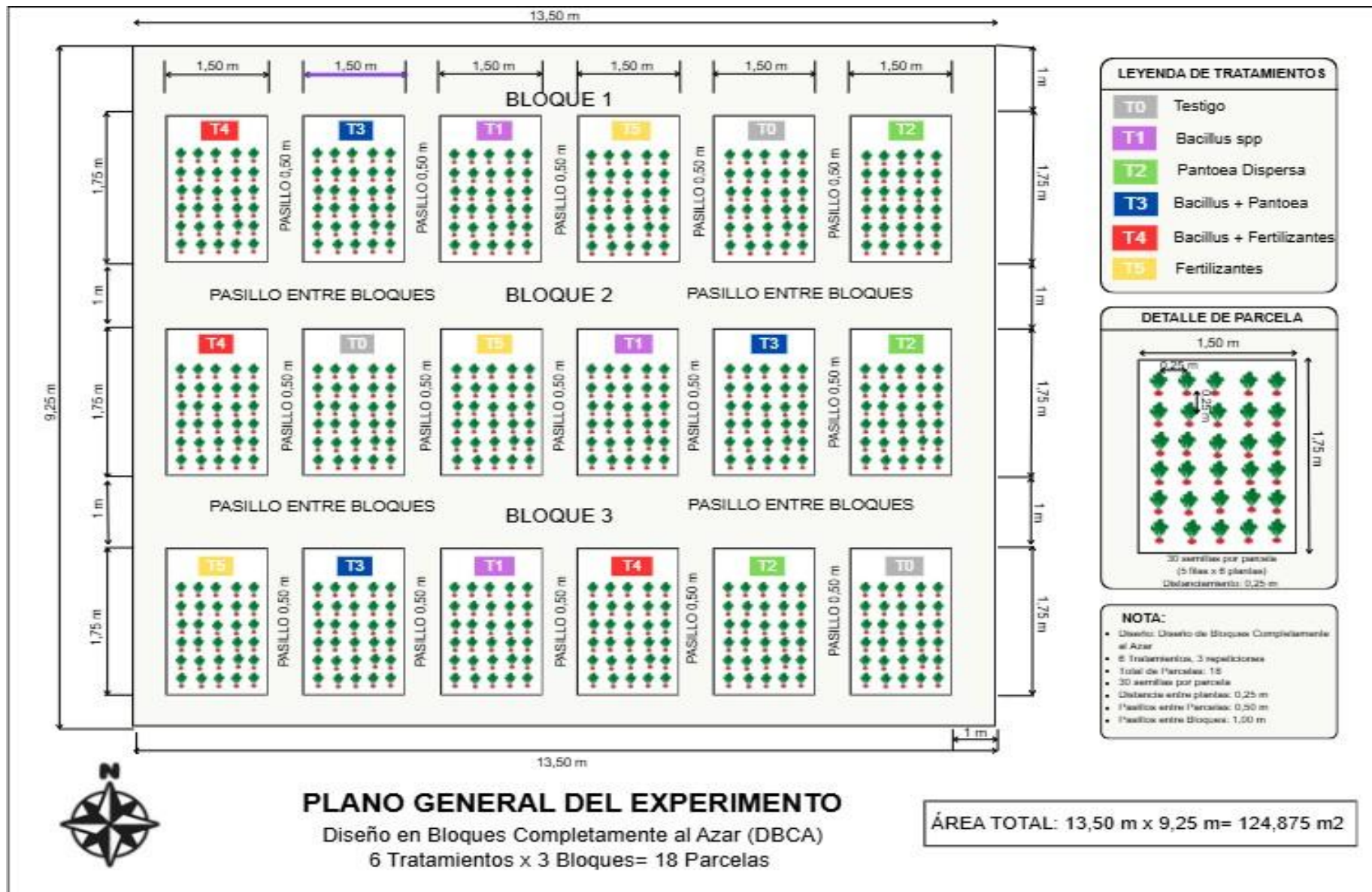


Figura 2: Croquis del experimento en campo

2.6 Manejo del experimento

Sitios de muestreo

El experimento se llevó a cabo en el Centro de Apoyo de Colonche, ubicado en la provincia de Santa Elena, donde se establecieron las parcelas experimentales bajo condiciones de campo. La selección del área de estudio responde a las características edafoclimáticas de la zona y a la disponibilidad de infraestructura para el desarrollo de investigaciones agrícolas.

Las parcelas fueron delimitadas considerando criterios de homogeneidad del terreno, con el propósito de reducir la variabilidad asociada a factores edáficos y ambientales. Asimismo, se mantuvo una distribución adecuada entre tratamientos y repeticiones, permitiendo un mejor control experimental y una evaluación más precisa del efecto de las rizobacterias autóctonas sobre el rendimiento del cultivo.

Preparación del suelo

Se inició la preparación del terreno mediante labores de labranza mecanizada, modelo NEW HOLLAND serie 7610 con un implemento de rastras de discos para un arado con profundidad de 15 cm donde se realizó el experimento, posterior a esto se usó el rastrillo, para la remoción de hierbas, disposición de desechos vegetales, escombros y elementos no orgánicos, con el objetivo de restaurar el terreno que no habría tenido actividad agrícola y así asegurar condiciones favorables para la siembra.

Delimitaciones del terreno

Al finalizar la limpieza del terreno, se llevó a cabo la demarcación de las parcelas experimentales. Cada parcela midió 1,75 m de largo por 1,50 m de ancho, lo que dio un área total de 2,625 m².

Selección de cepas bacterianas

Las cepas de *Bacillus subtilis* y *Pantoea dispersa*, fueron seleccionadas por su potencial reportado previamente como PGPR, mostrado en la Tabla 2. Reactivadas y mantenidas bajo condiciones adecuadas para preservar su viabilidad y pureza.

La selección de estas bacterias se fundamentó en investigaciones anteriores que reportan su capacidad para favorecer el crecimiento vegetal mediante mecanismos como la producción de fitohormonas, la solubilización de nutrientes y la estimulación del desarrollo radicular en cultivos como el maíz (Soto-Valenzuela *et al.*, 2026).

Tabla 2: Rizobacterias utilizadas en el experimento

Microorganismo	Código de accesoión Gen Bank	Efecto
<i>Bacillus subtilis</i>	MH598974.1	Mejora el crecimiento vegetal y la resistencia al estrés mediante producción de IAA, colonización eficiente y remodelación de la comunidad rizosférica; incrementa biomasa y reduce patógenos (Warthen et al., 2026).).
<i>Pantoea dispersa</i>	KF668475.1	Favorece germinación y desarrollo de maíz y hortalizas; aumenta densidad estomática y eficiencia fotosintética; posee genes para solubilización de fosfatos, producción de sideróforos y fitohormonas (Soto-Valenzuela et al., 2026; Hossain, 2024).

Reactivación y propagación bacteriana

Las cepas bacterianas fueron reactivadas y aisladas en medio de cultivo LMARC en cajas Petri dentro de la cámara de flujo laminar previamente esterilizada con los materiales a utilizar por 15 min con el propósito de obtener colonias viables para su posterior multiplicación, mediante un estriado simple. Los cultivos se mantuvieron bajo condiciones

controladas de laboratorio hasta evidenciar crecimiento bacteriano adecuado dentro de la incubadora a 30°C en un lapso de 48 a 72 horas.

Posteriormente, las colonias desarrolladas fueron transferidas a un medio líquido de crecimiento bacteriano (LMAR) en tubos de cultivo de 10 cm, se realizó tres estriados de cada aislado, para favorecer la multiplicación masiva de la biomasa y obtener una suspensión bacteriana con la concentración necesaria para la inoculación de los tratamientos experimentales, las suspensiones se incubaron durante 72 horas para alcanzar la concentración requerida para la inoculación.

Preparación de semillas e inoculación

Para la inoculación se seleccionaron aproximadamente 360 semillas de rábano, las cuales fueron distribuidas en bandejas previamente esterilizadas. Todos los materiales utilizados durante el procedimiento fueron sometidos a procesos de esterilización mediante calor húmedo a presión en la autoclave y manipulados bajo condiciones asépticas en una cámara de flujo laminar, con el propósito de evitar contaminaciones externas.

Previo a la inoculación, las semillas fueron desinfectadas en solución de cloro (10 ml) por 1 min, luego en alcohol etílico al 75% (10 ml) por 1 min y lavadas en 3 veces en 200 ml de agua destilada estéril, terminado esto fueron tratado con una solución de sacarosa para favorecer la adhesión de las bacterias a la superficie de las semillas correspondientes a los tratamientos inoculados, aplicando 20 µL de suspensión bacteriana por semilla.

Previamente a su aplicación, la concentración de cada suspensión fue estandarizada a aproximadamente 1×10^8 UFC mL⁻¹, mediante una combinación de medición de densidad óptica y conteo viable en placa.

Para la estandarización por espectrofotometría, se determinó la densidad óptica a 600 nm (OD₆₀₀) utilizando un espectrofotómetro, empleando como blanco el medio de cultivo estéril correspondiente. Las suspensiones bacterianas fueron diluidas cuando fue necesario para mantener las lecturas dentro del intervalo de medición lineal del equipo. La OD₆₀₀ se utilizó como indicador indirecto de la concentración celular y se relacionó con la concentración bacteriana viable mediante una curva de calibración previamente establecida para cada cepa.

La utilización de una curva OD_{600} –UFC mL^{-1} permite convertir la lectura espectrofotométrica en una estimación de la concentración bacteriana.

Las semillas inoculadas fueron colocadas sobre papel absorbente humedecido dentro de bandejas estériles, con el fin de mantener condiciones adecuadas de humedad para la germinación y facilitar la absorción de los microorganismos. Finalmente, las bandejas permanecieron en observación durante un período de 48 a 72 horas en incubadora humedeciendo una vez por día, hasta evidenciar el inicio del proceso de germinación.

Trasplante a campo

El trasplante se llevó a cabo cuando las plántulas alcanzaron una altura promedio de 5 cm, después de la emergencia, con el fin de obtener uniformidad y facilitar el establecimiento homogéneo de las unidades experimentales; y reducir el estrés y daño mecánico en la raíz primaria, conservando el sustrato adherido al sistema radical durante la extracción y realizando el trasplante inmediatamente después de retirarlas de la bandeja, manteniendo la misma profundidad de establecimiento. Posteriormente, se proporcionó humedad adecuada mediante el sistema de riego para favorecer la recuperación del sistema radical. Estas prácticas se basan en recomendaciones de manejo de propagación vegetal, acorde a Hartmann *et al.* (2018).

Además, estudios realizados en rábano han demostrado que, aunque la siembra directa puede favorecer mayores valores de diámetro y masa fresca de raíz, esta especie presenta tolerancia al trasplante cuando se realiza en etapas tempranas del desarrollo (Magalhães *et al.*, 2018). Por lo tanto, el procedimiento fue aplicado de manera uniforme en todas las unidades experimentales, considerando el trasplante como una condición común para todos los tratamientos evaluados. Se realizaron surcos de 7 cm de ancho por 10 cm de profundidad, con una distancia de 0,25 m entre plantas y entre hileras, estableciendo un total de 540 plantas en el área experimental.

Segunda inoculación bacteriana

A los 15 días después del trasplante se realizó una segunda inoculación de las cepas bacterianas *Bacillus subtilis* y *Pantoea dispersa*, empleando la misma suspensión bacteriana utilizada en la primera inoculación (LMAR). La concentración de cada suspensión fue

nuevamente estandarizada a aproximadamente 1×10^8 UFC mL⁻¹, mediante una combinación de medición de densidad óptica y estimada con una curva OD₆₀₀–UFC mL⁻¹.

La concentración viable fue posteriormente verificada mediante conteo en placa. Para ello, se realizaron diluciones seriadas decimales de la suspensión bacteriana en solución diluyente estéril y se sembraron alícuotas de las diluciones apropiadas sobre el medio de cultivo correspondiente. Después del periodo de incubación establecido para cada cepa, se seleccionaron las placas con un número adecuado de colonias para el recuento y se determinó la concentración bacteriana expresada como unidades formadoras de colonias por mililitro (UFC mL⁻¹), mediante la siguiente expresión:

$$\text{UFC mL}^{-1} = \text{número de colonias} \times \text{factor de dilución} / \text{volumen sembrado (mL)}.$$

El conteo en placa permitió corroborar la concentración de células bacterianas viables de la suspensión, complementando la estimación obtenida mediante OD₆₀₀. Este procedimiento es especialmente relevante debido a que la densidad óptica constituye una medida indirecta de la biomasa bacteriana y su relación con las UFC no es necesariamente constante entre diferentes cepas o concentraciones celulares.

Una vez verificada la concentración de aproximadamente 1×10^8 UFC mL⁻¹, la suspensión bacteriana fue aplicada nuevamente a las plantas a los 15 días después del trasplante, con el propósito de favorecer la reintroducción y establecimiento de las bacterias en la zona radicular y mantener su interacción con las plantas durante las etapas posteriores de crecimiento y desarrollo. La aplicación se efectuó directamente en la base de cada planta (1mL) a los tratamientos inoculados, procurando que la suspensión entrara en contacto con la zona radicular para facilitar la colonización de las raíces por parte de las bacterias.

La inoculación se realizó de forma manual, distribuyendo uniformemente la suspensión bacteriana en cada unidad experimental y evitando la contaminación entre tratamientos.

Esta práctica permite reforzar la población bacteriana en la zona radicular durante una etapa de rápido crecimiento del cultivo, donde aumenta la demanda de nutrientes y la interacción entre las raíces y los microorganismos benéficos.

Diversos estudios señalan que una única inoculación sobre la semilla puede no ser suficiente para mantener una población estable de PGPR durante todo el ciclo del cultivo, debido a la competencia con la microbiota del suelo, y a factores ambientales que afectan la supervivencia de los microorganismos. Por ello, la aplicación complementaria durante las primeras semanas de desarrollo contribuye a mejorar la colonización de la rizósfera, favoreciendo procesos como la producción de fitohormonas, la solubilización de fósforo y la absorción de nutrientes, lo que puede reflejarse en un mejor crecimiento y rendimiento del cultivo (Backer et al., 2018; Gouda et al., 2018).

Los tratamientos que no contemplaban la aplicación de microorganismos fueron manejados acorde a las condiciones establecidas en el diseño experimental.

Posteriormente, se efectuó un humedecimiento superficial para favorecer la infiltración de la suspensión bacteriana en el suelo y promover la interacción de los microorganismos con el sistema radicular de las plantas.

Plan de fertilización

El plan de fertilización (Tabla 3), se elaboró en base en los resultados del análisis químico del suelo realizado como servicio por el laboratorio del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), correspondiente a la muestra COLSUS 01 PROF 0.2. Los resultados indicaron un pH de 7,5, textura franco-arcillosa, materia orgánica de 1,41 %, conductividad eléctrica de 1,50 dS m⁻¹, fósforo disponible de 19 mg kg⁻¹, potasio de 550 mg kg⁻¹, calcio de 2637 mg kg⁻¹ y magnesio de 524 mg kg⁻¹. Estos valores evidenciaron un contenido bajo de materia orgánica, un nivel medio de fósforo y altos contenidos de potasio, calcio y magnesio.

Considerando estos resultados y los requerimientos nutricionales del cultivo de rábano para alcanzar un rendimiento comercial, se estableció un requerimiento de 80 kg ha⁻¹ de nitrógeno (N), 60 kg ha⁻¹ de fósforo (P₂O₅) y 60 kg ha⁻¹ de potasio (K₂O). Debido al bajo contenido de materia orgánica, se estimó que el suelo aportaría aproximadamente el 25 % del nitrógeno requerido durante el ciclo del cultivo, mientras que el fósforo disponible cubriría cerca del 50 % de la demanda. En el caso del potasio, el elevado contenido presente en el suelo permitió reducir considerablemente el aporte mediante fertilización.

El déficit nutricional se determinó mediante la siguiente expresión:

$$\text{Déficit nutricional} = \text{Requerimiento del cultivo} - \text{Aporte del suelo}$$

Cálculo del nitrógeno

Requerimiento del cultivo:

$$N_r = 80 \text{ kg ha}^{-1}$$

Aporte estimado del suelo:

$$N_s = 20 \text{ kg ha}^{-1}$$

Déficit:

$$\begin{aligned} N_d &= N_r - N_s \\ N_d &= 80 - 20 = 60 \text{ kg ha}^{-1} \end{aligned}$$

Cálculo del fósforo

Requerimiento:

$$P_r = 60 \text{ kg ha}^{-1}$$

Aporte estimado del suelo:

$$P_s = 30 \text{ kg ha}^{-1}$$

Déficit:

$$\begin{aligned} P_d &= P_r - P_s \\ P_d &= 60 - 30 = 30 \text{ kg ha}^{-1} \end{aligned}$$

La dosis del fertilizante se obtuvo mediante la ecuación:

$\text{Dosis del fertilizante} = \frac{\text{Nutriente requerido}}{\text{Fracción del nutriente en el fertilizante}}$

Cálculo del fertilizante 8–20–20

Como se requerían 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅, y el fertilizante contiene 20 % de fósforo:

$$\frac{30}{0.20} = 150 \text{ kg ha}^{-1}$$

Por tanto, la dosis recomendada fue de 150 kg ha⁻¹ de fertilizante 8–20–20.

Esta cantidad aporta:

Nitrógeno

$$150 \times 0.08 = 12 \text{ kg ha}^{-1}$$

Fósforo

$$150 \times 0.20 = 30 \text{ kg ha}^{-1}$$

Potasio

$$150 \times 0.20 = 30 \text{ kg ha}^{-1}$$

Cálculo del sulfato de amonio

El fertilizante 8–20–20 aportó únicamente 12 kg ha⁻¹ de nitrógeno, por lo que el nitrógeno restante fue:

$$60 - 12 = 48 \text{ kg ha}^{-1}$$

Debido a que el sulfato de amonio contiene 21 % de nitrógeno, la dosis se calculó de la siguiente manera:

$$\frac{48}{0.21} = 228.6 \text{ kg ha}^{-1}$$

La dosis se redondeó a 230 kg ha⁻¹.

Conversión de la dosis al área experimental

La superficie total fertilizada en el ensayo fue de 15,78 m², correspondiente a los tratamientos T4 y T5.

La conversión se realizó mediante la siguiente expresión:

$$\text{Gramos} = \frac{\text{kg ha}^{-1} \times \text{Área (m}^2\text{)}}{10000} \times 1000$$

Fertilizante 8–20–20

$$\begin{aligned} & \frac{150 \times 15.78}{10000} \times 1000 \\ &= 236.7 \text{ g} \end{aligned}$$

Se aplicaron **237 g** de fertilizante 8–20–20 en toda el área fertilizada.

Sulfato de amonio

$$\begin{aligned} & \frac{230 \times 15.78}{10000} \times 1000 \\ &= 362.9 \text{ g} \end{aligned}$$

Se aplicaron **363 g** de sulfato de amonio durante el ciclo del cultivo.

Tabla 3: Total plan de fertilización

Etapa	Fertilizante	Dosis	Dosis para 15,78 m ² (g)	Aplicación
Basal	Fertilizante 8-20-20	150 gramos	237 g	Mezclar y aplicar al suelo antes de sembrar a 5 cm de profundidad
Siembra	Sulfato de amonio	80 gramos	126 g	A los 15 días después de la siembra, aplicar a un costado del rábano y regar inmediatamente.
Cobertura	Sulfato de amonio	150 gramos	237 g	

Manejo fitosanitario

Durante el desarrollo del experimento se realizaron inspecciones periódicas en las parcelas con el fin de identificar la presencia de plagas, enfermedades o cualquier otro factor que pudiera afectar el crecimiento y desarrollo del cultivo de rábano.

Durante el ciclo del cultivo no se registró la incidencia de plagas ni enfermedades que requirieran la aplicación de productos fitosanitarios. Sin embargo, se efectuaron labores de control manual de malezas para reducir la competencia por agua, luz y nutrientes, manteniendo las condiciones adecuadas para el desarrollo de las plantas.

Las actividades de deshierbe se realizaron de forma manual 1 a 2 veces por semana, procurando mantener las parcelas libres de malezas y garantizando condiciones homogéneas para todos los tratamientos evaluados.

Frecuencia de riego

Determinación del requerimiento hídrico del cultivo de rábano

El requerimiento hídrico del cultivo de rábano (*Raphanus sativus* L.) se estimó para el período experimental comprendido entre el 24 de abril y el 4 de junio, correspondiente a un ciclo de 42 días, desarrollado en la parroquia Colonche, provincia de Santa Elena.

Para la caracterización climática se utilizó como estación meteorológica de referencia la estación M780 Colonche, debido a su correspondencia espacial con la zona donde se desarrolló el experimento. Los registros climáticos disponibles de esta estación fueron utilizados como referencia para representar las condiciones meteorológicas de Colonche.

Debido a que no se dispuso de una serie diaria completa de radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento para todo el período experimental, la evapotranspiración de referencia (ET_o) se estimó mediante el método de Hargreaves-Samani. Este método permite estimar la evapotranspiración de referencia utilizando la temperatura máxima, la temperatura mínima y la radiación extraterrestre, constituyendo una alternativa cuando no se dispone de todas las variables meteorológicas requeridas para la aplicación del método FAO Penman-Monteith.

La evapotranspiración de referencia se calculó mediante la siguiente expresión:

$$ET_o = 0,0023(T_{med} + 178)(T_{max} - T_{min})^{0,5}R_a$$

Donde:

- ET_o = evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹);
- T_{med} = temperatura media del aire (°C);
- T_{max} = temperatura máxima del aire (°C);
- T_{min} = temperatura mínima del aire (°C);
- R_a = radiación extraterrestre (MJ m⁻² día⁻¹).

La radiación extraterrestre se determinó considerando la ubicación geográfica de Colonche y el día del año. FAO establece que R_a depende de la latitud y de la época del año.

La evapotranspiración del cultivo (ET_c) se determinó mediante:

$$ET_c = ET_o \times K_c$$

Para el rábano se utilizaron los coeficientes de cultivo establecidos por FAO-56 para este cultivo: $K_{c,ini} = 0,70$, $K_{c,mid} = 0,90$ y $K_{c,end} = 0,85$. FAO señala que el coeficiente de cultivo varía durante el ciclo y que deben considerarse las etapas inicial, de desarrollo, media y final.

Debido a que el ciclo experimental tuvo una duración de 42 días, se establecieron cuatro periodos para el cálculo: 7 días para la etapa inicial, 14 días para la etapa de desarrollo, 14 días para la etapa media y 7 días para la etapa final. Durante las etapas de desarrollo y final se realizó una interpolación lineal del coeficiente de cultivo entre los valores de referencia.

El volumen equivalente de agua se determinó considerando el área experimental total de **2.625 m²**, mediante:

$$V = ET_c \times A$$

Donde:

- V = volumen equivalente de agua (L);
- ET_c = evapotranspiración del cultivo acumulada (mm);
- A = área experimental (m^2).

Se consideró que:

$$1 \text{ mm} = 1 \text{ L/m}^2$$

Por tanto, para el área experimental de 2.625 m^2 :

$$V = ET_c \times 2.625$$

Tabla 4: Estimación del requerimiento hídrico del rábano

Etapas fenológica	Período	Días	Kc	ET_o acumulada (mm)	ET_c acumulada (mm)	Volumen equivalente (L)	Volumen equivalente (m³)
Inicial	24-30 abril	7	0,70	75,25	52,68	138.273,00	138,27
Desarrollo	1-14 mayo	14	0,70- 0,90	151,21	121,97	320.167,13	320,17
Media	15-28 mayo	14	0,90	146,89	132,20	347.025,99	347,03
Final	29 mayo- 4 junio	7	0,90- 0,85	71,56	62,37	163.727,42	163,73
Total	24 abril- 4 junio	42	—	444,91	369,22	969.193,53	969,19

Fuente: Elaboración propia a partir de información meteorológica de referencia de la estación M780 Colonche y metodología FAO para la estimación de la evapotranspiración de referencia y del coeficiente de cultivo. .

Cálculo del resultado total

La evapotranspiración de referencia acumulada durante los 42 días fue:

$$ET_o = 444,91 \text{ mm}$$

Después de aplicar los coeficientes de cultivo:

$$ET_c = 369,22 \text{ mm}$$

Por tanto, para el área total:

$$V = 369,22 \times 2.625$$

$$V = 969.193,53 \text{ L}$$

Convirtiendo a metros cúbicos:

$$V = \frac{969.193,53}{1.000}$$

$$V=969,19\text{m}^3$$

2.7 Parámetros evaluados

Morfológicos

Se inició con la toma de datos desde el tercer día de la fase de emergencia tomando datos una vez por semana, hasta la quinta semana de cosecha, fueron seleccionadas al azar 12 plantas centrales (elección de posiciones previamente numeradas) dentro del área útil, dejando así el efecto borde, repitiendo este proceso en cada tratamiento. Se consideró iniciar a partir del tercer día después del trasplante, germinación y aplicación de tratamientos, las variables evaluadas fueron (1) altura de la planta, (2) número de hojas, (3) longitud de la raíz, (4) peso fresco y (5) diámetro del rábano.

Altura de la planta: se determinó a través de la medición de la distancia que existe entre la superficie del suelo y la punta de la hoja más alta de cada ejemplar. Para esto, se utilizó una regla marcada en centímetros. Los resultados fueron anotados en centímetros (cm).

Número de hojas: el total de hojas se obtuvo mediante un conteo directo de hojas desarrolladas en las 12 plantas que se escogió al momento de la evaluación.

Longitud de la raíz: la longitud de la raíz se analizó al instante de la cosecha midiendo la distancia desde la parte inferior del cuello de la planta hasta el extremo más bajo de la raíz primaria. La medición se realizó con el calibrador Vernier registrados en centímetro (cm).

Peso fresco: el peso fresco se evaluó de forma inmediata posterior a la cosecha, utilizando la balanza de precisión. Cada bulbo fue pesado y registrado en gramos (g).

Diámetro del rábano: el diámetro de la raíz comercial se midió en la sección de mayor amplitud utilizando calibrador Vernier y representado en centímetros

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Altura de la planta

La altura de planta fue evaluada semanalmente desde la emergencia hasta la cosecha con el propósito de determinar la respuesta del cultivo frente a la inoculación de las cepas de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. En la Tabla 5 se presenta el comportamiento de esta variable durante las cinco semanas de evaluación.

Tabla 5: Altura promedio de planta (cm) del cultivo de rábano (*Raphanus sativus* L.) durante las cinco semanas de evaluación.

Tratamiento	Día 3	Día 7	Día 14	Día 21	Día 28
T0	1,17 c	2,45 c	3,98 e	6,06 f	8,46 f
T1	1,85 b	3,58 bc	6,07 d	9,25 e	13,46 e
T2	2,15 b	4,23 bc	7,48 c	11,37 d	15,72 d
T3	2,77 a	5,24 abc	9,25 b	14,17 c	20,07 c
T4	3,09 a	7,78 a	11,13 a	17,09 a	24,01 a
T5	2,96 a	5,97 ab	11,24 a	16,19 b	22,67 b

Medias con letras iguales dentro de cada columna no presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p > 0,05$).

Fuente: Cristhy Palma Panchana (2026).

El análisis de varianza mostró que el efecto de los tratamientos fue altamente significativo ($p < 0,05$) en todas las semanas evaluadas, mientras que el efecto de los bloques no presentó diferencias significativas. Durante las primeras semanas las diferencias entre tratamientos fueron poco marcadas; sin embargo, conforme avanzó el desarrollo del cultivo estas se hicieron más evidentes. Al finalizar el ensayo, el tratamiento T4 (*Bacillus subtilis* + fertilizante) alcanzó la mayor altura promedio con 24,01 cm, diferenciándose estadísticamente del resto de los tratamientos. Por el contrario, el tratamiento control (T0) registró la menor altura con 8,46 cm. Los tratamientos T5 y T3 ocuparon posiciones intermedias, mientras que T1 y T2 mostraron un crecimiento superior al control, aunque inferior al obtenido con la combinación de fertilización e inoculación.

Estos resultados indican que, la respuesta de las plantas no fue inmediata tras la inoculación sino que se manifestó de manera progresiva a medida que avanzó el ciclo del cultivo. Este comportamiento es esperable en cultivos de crecimiento rápido como el rábano, donde las diferencias entre tratamientos suelen hacerse más evidentes conforme aumenta la demanda fisiológica de la planta. En este estudio, los tratamientos que incorporaron microorganismos benéficos mantuvieron una tendencia de crecimiento constante durante todo el periodo de evaluación, mientras que el tratamiento sin inoculación presentó un desarrollo más limitado.

El comportamiento observado coincide con lo reportado por Ngalimat et al. (2021), quienes señalan que especies del género *Bacillus* favorecen el establecimiento inicial y el crecimiento vegetativo de diversos cultivos mediante su interacción con la rizosfera. De manera similar, Aloo et al. (2022) mencionan que las bacterias promotoras del crecimiento vegetal contribuyen a mejorar el vigor de las plantas, especialmente durante las primeras etapas de desarrollo, lo que posteriormente se refleja en un mayor crecimiento vegetativo.

Aunque el tratamiento T4 presentó los mayores valores de altura, resulta importante destacar el desempeño de T3, conformado por la combinación de *Bacillus subtilis* y *Pantoea dispersa*, mostró una respuesta superior a la obtenida con las cepas aplicadas individualmente, lo que sugiere una interacción favorable entre ambos microorganismos, bajo las condiciones en las que se desarrolló el experimento. No obstante, su efecto fue menor al observado cuando la inoculación se complementó con fertilización, lo que evidencia la importancia de un adecuado manejo nutricional para expresar el máximo potencial del cultivo.

Sin embargo, no todas las investigaciones han obtenido resultados similares, como Rojas et al. (2021) evaluaron la inoculación con PGPR en hortalizas y no encontraron diferencias significativas en la altura de las plantas respecto al testigo. Los autores atribuyeron estos resultados a las características del suelo, la adaptación de las cepas utilizadas y las condiciones ambientales durante el cultivo. Estas diferencias demuestran que la respuesta a la inoculación con PGPR depende de la interacción entre la cepa bacteriana, la especie vegetal y las condiciones edafoclimáticas, lo cual puede variar entre investigaciones.

Desde el punto de vista agronómico, una mayor altura de planta suele asociarse con un mejor establecimiento del cultivo y con una mayor capacidad para sostener el desarrollo de los órganos de interés comercial. En este sentido, los resultados obtenidos demuestran que la

aplicación de los tratamientos evaluados influyó sobre el crecimiento vegetativo del rábano, siendo más evidente en aquellos donde se combinaron prácticas biológicas y nutricionales.

3.2 Número de hojas

En la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos para el número promedio de hojas del cultivo de rábano al momento de la cosecha. El análisis de varianza evidenció diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$), lo que indica que la aplicación de los distintos tratamientos influyó sobre el desarrollo foliar del cultivo. Por su parte, el efecto de los bloques no fue significativo, lo que demuestra que las condiciones experimentales fueron homogéneas y que las diferencias observadas se atribuyen principalmente a los tratamientos evaluados.

Tabla 6: Número promedio de hojas del cultivo de rábano (*Raphanus sativus* L.) bajo los diferentes tratamientos.

Tratamiento	Número promedio de hojas (cm)	Significancia Tukey
T0 Control (Agua)	4.93	d
T1 <i>Bacillus subtilis</i>	7.36	c
T2 <i>Pantoea dispersa</i>	7.31	c
T3 <i>Bacillus subtilis</i> + <i>Pantoea dispersa</i>	10.07	b
T4 <i>Bacillus subtilis</i> + Fertilización	11.39	a
T5 Fertilización química	8.48	c

Medias con la misma letra no presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

Fuente: Cristhy Palma Panchana (2026).

De acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Tukey, el tratamiento T4 (*Bacillus subtilis* + fertilizante) registró el mayor número promedio de hojas con 11,39, diferenciándose estadísticamente de los demás tratamientos. En contraste, el tratamiento control (T0) presentó el menor valor con 4,93 hojas, mientras que T1, T2 y T5 no mostraron diferencias significativas entre sí al compartir la misma agrupación estadística. El

tratamiento T3 alcanzó un valor intermedio (10,07 hojas), superando a los tratamientos con aplicaciones individuales de las cepas bacterianas, aunque sin igualar el comportamiento observado en T4.

El incremento en el número de hojas observado en los tratamientos inoculados representa una respuesta favorable del cultivo, ya que el desarrollo foliar está directamente relacionado con la capacidad de interceptar la radiación solar y mantener una adecuada actividad fotosintética durante el ciclo de crecimiento. En cultivos de raíz como el rábano, una mayor superficie foliar favorece la producción de fotoasimilados, los cuales a posterior son llevados hacia la raíz de reserva, contribuyendo al incremento de su desarrollo y calidad comercial.

Los resultados obtenidos son consistentes con lo reportado por Aloo *et al.* (2022), quienes señalan que la inoculación con PGPR favorece el desarrollo vegetativo mediante una mejor respuesta entre la planta y microbiota de la rizosfera, reflejándose en un mayor crecimiento del follaje. De igual manera, Backer *et al.* (2018) mencionan que las PGPR pueden estimular el establecimiento inicial del cultivo y mejorar el desarrollo de los órganos aéreos cuando las condiciones de manejo y nutrición son adecuadas.

No obstante, existen investigaciones que difieren de los resultados obtenidos en este estudio. Paredes y Cedeño (2022), al evaluar diferentes cepas bacterianas en cultivos hortícolas, no encontraron diferencias significativas en el número de hojas entre tratamientos inoculados y el testigo. Los autores indicaron que la respuesta estuvo influenciada por las condiciones del suelo y la capacidad de adaptación de las cepas bacterianas utilizadas. Estas diferencias confirman que la eficacia de las PGPR puede variar dependiendo de la especie vegetal, las características del suelo y las condiciones ambientales presentes durante el cultivo.

En el presente estudio, la respuesta más favorable correspondió al tratamiento que combinó la inoculación con *Bacillus subtilis* y la fertilización (T4), lo que sugiere que una probable integración de estrategias biológicas y nutricionales permitió una mayor expresión del potencial de crecimiento del cultivo. Por otra parte, aunque los tratamientos inoculados individualmente mostraron un incremento respecto al control. Y que, la magnitud de la respuesta fue menor, lo que evidencia que el efecto de las PGPR puede potenciarse cuando se complementa con un adecuado suministro de nutrientes.

En conjunto, estos resultados respaldan que la aplicación de los tratamientos evaluados modificó significativamente el desarrollo foliar del cultivo de rábano, observándose un comportamiento superior en los tratamientos que incorporaron microorganismos benéficos, especialmente cuando fueron utilizados en combinación con fertilización.

3.3 Diámetro del tallo

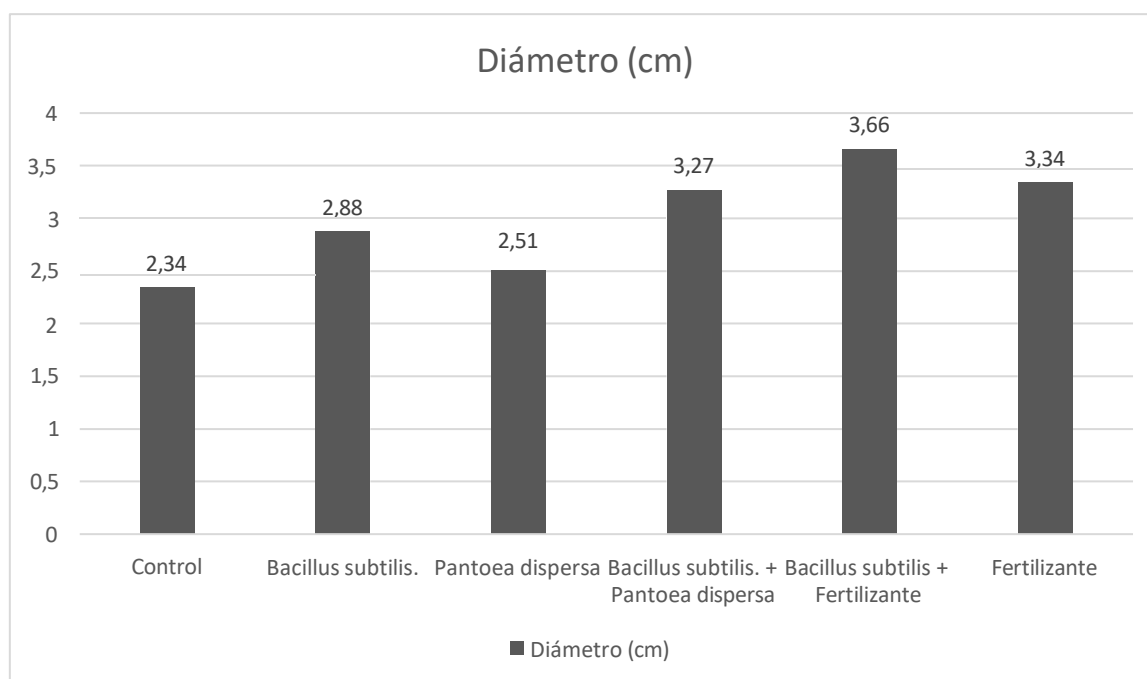


Figura 3: Diámetro promedio de la raíz del cultivo de rábano bajo los diferentes tratamientos.

En la Figura 3, se presentan los valores correspondientes al diámetro promedio de la raíz comercial del cultivo de rábano. El análisis de varianza evidenció diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$), lo que indica que la aplicación de los distintos tratamientos influyó sobre esta característica. En contraste, el efecto de los bloques no fue significativo, lo que confirma que las diferencias observadas se atribuyen al efecto de los tratamientos evaluados y no a la variabilidad del terreno.

La prueba de Tukey mostró que el tratamiento T4 (*Bacillus subtilis* + fertilizante) obtuvo el mayor diámetro promedio de la raíz con 3,66 cm, diferenciándose significativamente de T0 y T2. Sin embargo, no presentó diferencias estadísticas con T3 (3,27 cm) ni con T5 (3,34 cm), debido a que estos tratamientos compartieron la misma agrupación estadística.

Por su parte, el tratamiento control registró el menor diámetro (2,34 cm), evidenciando un desarrollo inferior de la raíz comercial respecto a los tratamientos inoculados o fertilizados.

El diámetro constituye uno de los principales indicadores de calidad comercial en el cultivo de rábano, ya que determina el tamaño del órgano cosechado y, en consecuencia, su aceptación en el mercado. En este estudio se observó que los tratamientos que incorporaron microorganismos benéficos, solos o combinados con fertilización, favorecieron un mayor engrosamiento de la raíz en comparación con el tratamiento sin inoculación. Este comportamiento sugiere que un crecimiento vegetativo más equilibrado durante el ciclo del cultivo permitió una mayor acumulación de biomasa en el órgano de reserva.

Los resultados obtenidos guardan relación con lo reportado por Mahanty et al. (2017), quienes indican que la aplicación de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal puede incrementar el desarrollo de órganos de almacenamiento en cultivos hortícolas, siempre que existan condiciones adecuadas de manejo agronómico. De manera similar, Colla y Rouphael (2024) señalan que, la combinación de microorganismos benéficos con prácticas de fertilización favorece la eficiencia fisiológica del cultivo, lo que puede reflejarse en un incremento del tamaño y calidad de los órganos comerciales.

Aunque T4 presentó el mayor diámetro promedio, la ausencia de diferencias significativas con T3 y T5 indica que estos tratamientos mostraron un comportamiento estadísticamente similar para esta variable. Este resultado pone de manifiesto que tanto la inoculación combinada como la fertilización fueron suficientes para favorecer el engrosamiento de la raíz bajo las condiciones del ensayo, aun cuando el valor promedio más alto correspondió al tratamiento que integró *Bacillus subtilis* con fertilización.

Sin embargo, otros estudios han mostrado respuestas diferentes. Silva *et al.* (2021) no observaron diferencias estadísticas en el diámetro de raíces al utilizar PGPR en cultivos hortícolas, indicando que la respuesta dependió de las condiciones de fertilidad del suelo y de la compatibilidad entre la cepa bacteriana y planta hospedera. Estas diferencias reflejan que el efecto de los microorganismos benéficos no es uniforme y puede variar según las condiciones de cada sistema de producción.

En términos productivos, un mayor diámetro representa una característica deseable debido a que incrementa el valor comercial del cultivo. Los resultados obtenidos permiten afirmar que la aplicación de los tratamientos evaluados contribuyó a mejorar este atributo respecto al tratamiento control, destacándose especialmente aquellos que incluyeron

microorganismos promotores del crecimiento en combinación con un adecuado manejo nutricional.

3.4 Longitud de la raíz comercial

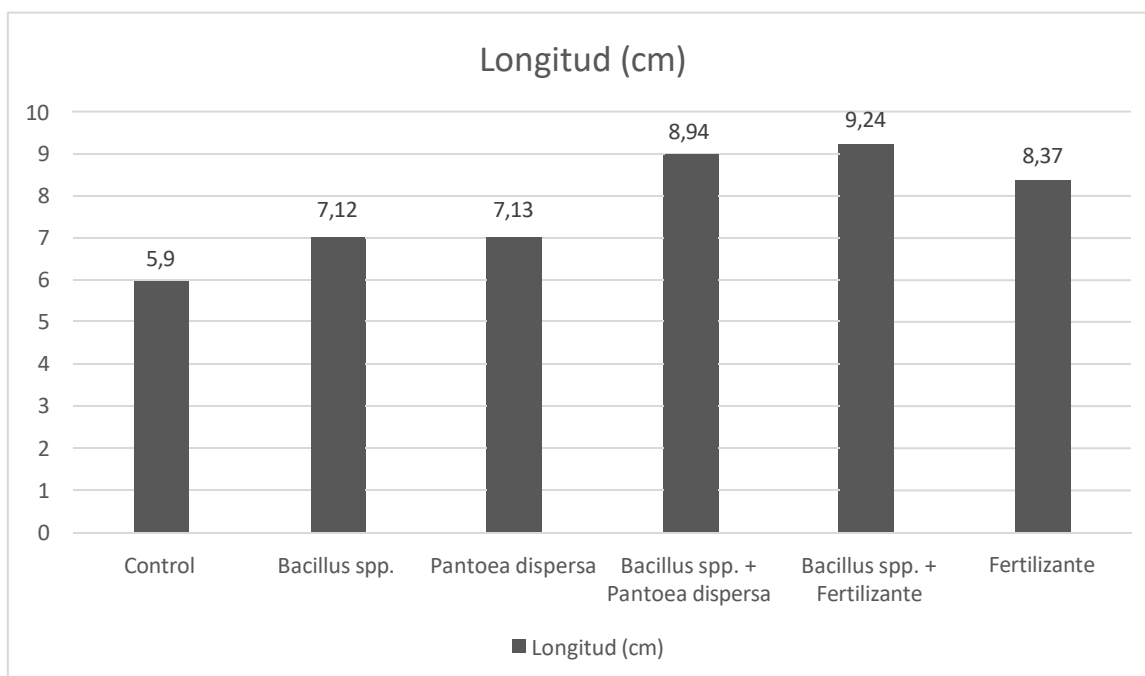


Figura 4: Longitud promedio de la raíz del cultivo de rábano bajo los diferentes tratamientos.

La longitud de la raíz constituye un indicador del desarrollo del órgano de reserva del rábano y permite valorar la respuesta del cultivo frente a los tratamientos aplicados. En la Figura 7 se presentan los valores promedio obtenidos al momento de la cosecha.

El análisis de varianza mostró diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$), mientras que el efecto de los bloques no fue significativo. De acuerdo con la prueba de Tukey, el tratamiento T4 (*B. subtilis* + fertilizante) registró la mayor longitud de raíz con 9,24 cm, diferenciándose estadísticamente de T0, T1 y T2. En cambio, no presentó diferencias significativas con T3 (8,94 cm) ni con T5 (8,37 cm), debido a que compartieron la misma agrupación estadística. Por su parte, el tratamiento control obtuvo la menor longitud promedio (5,90 cm), lo que evidencia un menor desarrollo de la raíz en ausencia de inoculación o fertilización.

El crecimiento de la raíz constituye una etapa determinante en el cultivo de rábano, ya que este órgano representa la parte comercial de la planta. Una raíz con mayor longitud refleja

un desarrollo más eficiente durante el ciclo del cultivo y una mejor capacidad para explorar el suelo, condición que favorece el aprovechamiento de agua y nutrientes disponibles. En el presente estudio se observó que los tratamientos que incorporaron rizobacterias, especialmente cuando se combinaron con fertilización, promovieron un desarrollo radicular superior al tratamiento control.

Estos resultados coinciden con la investigación desarrollada por Carrión (2020), quien encontró que la aplicación de PGPR incrementó significativamente la longitud de las raíces en especies forrajeras, atribuyendo este comportamiento a una interacción más eficiente entre las plantas y los microorganismos presentes en la rizosfera. Así mismo, una investigación reciente desarrollada en la UPSE reportó que cepas de *Pantoea dispersa* favorecieron el crecimiento inicial de las plantas al estimular el desarrollo del sistema radicular y mejorar el establecimiento del cultivo bajo condiciones controladas.

De igual manera, la caracterización de cepas PGPR realizada en la UPSE destaca que géneros como *Bacillus* poseen mecanismos que favorecen la disponibilidad de nutrientes e interacción con las raíces, aspectos que contribuyen al crecimiento de diferentes cultivos de interés agrícola. Lo cual respalda el comportamiento observado en el presente estudio, donde los tratamientos inoculados superaron al control en la longitud de la raíz.

Aunque el tratamiento T4 presentó el mayor promedio, estadísticamente compartió grupo con T3 y T5, por lo que no puede afirmarse que haya sido superior a estos tratamientos para esta variable. Sin embargo, la tendencia observada permite considerar que la integración de microorganismos benéficos con un adecuado manejo nutricional favoreció un desarrollo radicular más uniforme durante el ciclo del cultivo.

Sin embargo, otros estudios han mostrado resultados diferentes. En una investigación realizada sobre el cultivo de rábano en la Universidad Técnica de Cotopaxi, aunque se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para la longitud de la raíz, el mayor crecimiento estuvo asociado a la frecuencia de aplicación de un biol orgánico y no al uso de microorganismos benéficos, lo que evidencia que diferentes estrategias de manejo agronómico pueden influir sobre esta variable. Asimismo, existen investigaciones donde la inoculación con PGPR no produjo incrementos importantes en la longitud radicular debido

a diferencias en las características del suelo, las cepas bacterianas utilizadas y las condiciones ambientales del ensayo.

En conjunto, los resultados demuestran que la inoculación con PGPR autóctonas contribuyó al crecimiento de la raíz comercial del rábano respecto al tratamiento sin inoculación. Lo cual constituye un aspecto relevante desde el punto de vista agronómico, debido a que la longitud de la raíz influye directamente en la calidad y el potencial productivo del cultivo.

3.5 Peso fresco de la raíz comercial

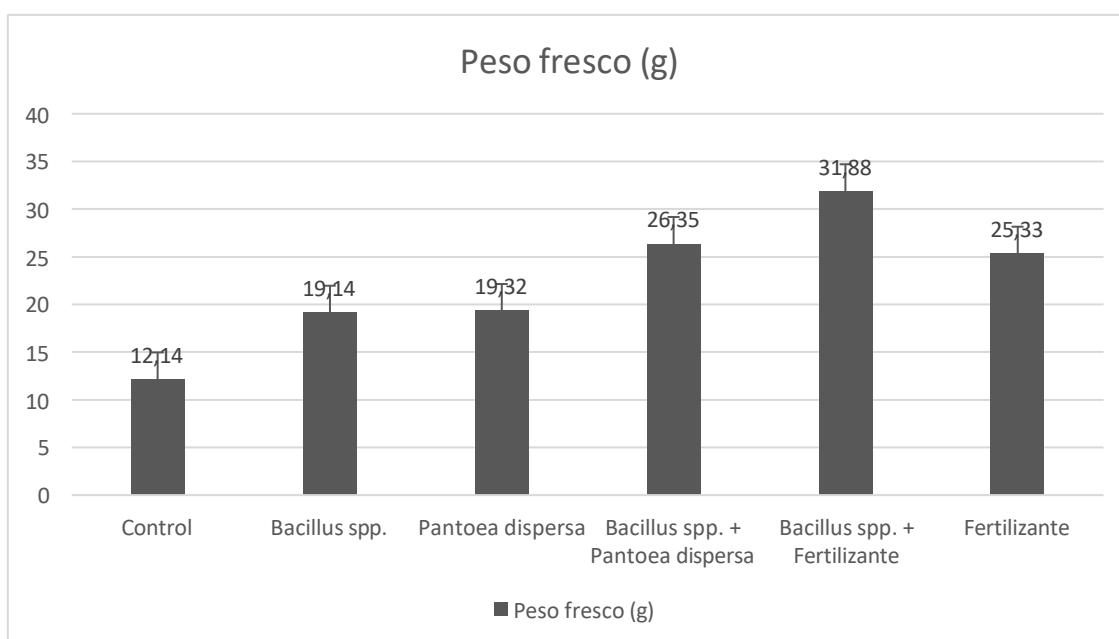


Figura 5: Peso fresco promedio de la raíz del cultivo de rábano bajo los diferentes tratamientos.

El peso fresco constituye el principal indicador del rendimiento del cultivo, ya que refleja la cantidad de biomasa acumulada en la raíz al momento de la cosecha. La Figura 5 presenta los valores obtenidos para esta variable en los diferentes tratamientos evaluados. El análisis de varianza evidenció diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$), mientras que el efecto de los bloques no fue significativo. Según la prueba de comparación de medias de Tukey, el tratamiento T4 (*B. subtilis* + fertilizante) alcanzó el mayor peso fresco con 31,88 g, diferenciándose estadísticamente de T0, T1 y T2. Pero, no presentó diferencias significativas con T3 (26,35 g) ni con T5 (25,33 g), ya que estos tratamientos compartieron la misma agrupación estadística. El tratamiento control registró el menor valor (12,14 g), lo que evidencia un menor rendimiento cuando no se aplicó inoculación ni fertilización.

El incremento del peso fresco observado en los tratamientos inoculados sugiere que las plantas lograron una mayor acumulación de biomasa en la raíz durante el ciclo del cultivo. En el rábano, esta variable tiene especial importancia porque representa directamente la fracción comercial cosechada; por ello, pequeñas variaciones en el peso pueden traducirse en diferencias relevantes desde el punto de vista productivo y económico.

Los resultados obtenidos son similares a los reportados por Rojas et al. (2023), quienes observaron que la aplicación de bacterias PGPR incrementó el rendimiento de cultivos hortícolas al favorecer una mayor acumulación de biomasa en los órganos cosechables. Así mismo, Colla y Roupael (2024) señalan que, la integración de microorganismos benéficos con estrategias de nutrición vegetal puede mejorar la eficiencia productiva del cultivo, especialmente cuando ambos componentes actúan de forma complementaria.

En el contexto ecuatoriano, investigaciones desarrolladas en la Universidad Estatal Península de Santa Elena mencionan el potencial de las cepas autóctonas de *Bacillus* y *Pantoea* aisladas de la rizosfera como posibles bioinoculantes en sistemas agrícolas, debido a su capacidad de promover el crecimiento y mejorar el desempeño de los cultivos en las condiciones edafoclimáticas de la provincia de Santa Elena. Estos antecedentes respaldan la tendencia observada en el presente estudio, donde los tratamientos con PGPR presentaron un mayor peso fresco en comparación con el control (Soto-Valenzuela *et al.*, 2026).

Aunque el tratamiento T4 registró el valor promedio más alto, la ausencia de diferencias significativas con T3 y T5 indica que estos tratamientos alcanzaron un comportamiento estadísticamente comparable para esta variable. Lo cual sugiere que, la combinación de microorganismos o la aplicación de fertilización son alternativas capaces de incrementar el rendimiento respecto al control, mientras que la integración de *Bacillus subtilis* con fertilización mostró la mejor respuesta promedio bajo las condiciones del experimento.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten aceptar la hipótesis de investigación (H_1), ya que la inoculación con cepas PGPR, particularmente cuando se combinaron con fertilización, mejoró el rendimiento del cultivo de rábano expresado como peso fresco de la raíz respecto al tratamiento sin inoculación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Se determinó que la aplicación de las cepas nativas de *Bacillus subtilis* y *Pantoea dispersa*, tanto individualmente como en combinación, favoreció significativamente el crecimiento vegetativo del cultivo de rábano en comparación con el tratamiento control. La combinación de ambas cepas (T3) mostró una respuesta superior a sus aplicaciones individuales en variables como altura de planta y número de hojas; sin embargo, el tratamiento *B. subtilis* + fertilización (T4) alcanzó los mayores valores de crecimiento y número de hojas por planta, evidenciando que la incorporación de la inoculación bacteriana con la disponibilidad de nutrientes permitió expresar una mayor respuesta vegetativa.

Se concluye que, los tratamientos con cepas nativas especialmente cuando fueron complementados con fertilización, incrementaron el rendimiento del cultivo de rábano, expresado mediante el peso fresco de la raíz comercial. El tratamiento T4 presentó el mayor peso fresco superando estadísticamente al control, T1 y T2; no obstante, no presentó diferencias significativas respecto a T3 (*B. subtilis* + *P. dispersa*) ni T5 (fertilización química). Por tanto, la inoculación bacteriana, particularmente en combinación con una adecuada nutrición, puede contribuir al incremento del rendimiento del rábano.

Al comparar el comportamiento agronómico de los tratamientos, se identificó a T4 (*B. subtilis* + fertilización) como el tratamiento con la mayor respuesta productiva promedio, debido a que presentó los valores más altos de altura de planta, número de hojas, diámetro y longitud de raíz y peso fresco. Sin embargo, desde una perspectiva estadística, T4 no fue superior en todas las variables a T3 (*B. subtilis* + *P. dispersa*) ni a T5 (fertilización química), ya que estos tratamientos compartieron grupos estadísticos en algunas variables. En consecuencia, los resultados evidencian que la combinación de *B. subtilis* con fertilización convencional fue la alternativa de mayor desempeño productivo bajo las condiciones del ensayo, mientras que la coinoculación de *B. subtilis* + *P. dispersa* mostró un comportamiento promisorio como alternativa biológica.

Recomendaciones

- Evaluar el comportamiento de las cepas *B. subtilis* y *P. dispersa* en diferentes épocas de siembra y condiciones edafoclimáticas para determinar la estabilidad de su efecto sobre el cultivo de rábano.
- Realizar análisis microbiológicos del suelo antes y después de la inoculación para determinar la persistencia y capacidad de colonización de las cepas bacterianas utilizadas.
- Desarrollar investigaciones hacia otros cultivos hortícolas de importancia económica con el propósito de verificar el potencial de estas cepas bacterianas bajo diferentes sistemas de producción.
- Realizar investigaciones que incluyan diferentes concentraciones de inoculación y frecuencias de aplicación para establecer la dosis más eficiente en el cultivo de rábano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ngalimat, M.S., Yahaya, R.S.R., Baharudin, M.M.A., Yaminudin, S.Mohd., Karim, M., Ahmad, S.A. and Sabri, S. (2021). A Review on the Biotechnological Applications of the Operational Group *Bacillus amyloliquefaciens*. *Microorganisms*, [online] 9(3), p.614. doi:10.3390/microorganisms9030614.
- Silva, R., Antunes, L., Aquino, J., Silva de Sousa, R., José de Melo, W. y Araujo, A., 2021. Plant growth-promoting rhizobacteria effect on maize growth and microbial biomass in a chromium-contaminated soil. *Bragantia*, 80, e2821. doi: [10.1590/1678-4499.2wang0200492](https://doi.org/10.1590/1678-4499.2wang0200492)
- Holguín Alay, B.J. (2021). *Respuesta agronómica del cultivo de rábano (Raphanus sativus L.) con diferentes sustratos orgánicos, en el Centro de Apoyo Manglaralto, UPSE de la provincia de Santa Elena*. Trabajo de Titulación. Universidad Estatal Península de Santa Elena. doi: <https://repositorio.upse.edu.ec/server/api/core/bitstreams/978c388a-2032-49ea-9d0b-95ce058ce51c/content>
- Orrala Tomalá, E.D. (2025). *Caracterización de cepas bacterianas tipo PGPR obtenidas de la rizosfera de cultivos vegetales de la comuna Colonche, provincia de Santa Elena*. Trabajo de Integración Curricular. Universidad Estatal Península de Santa Elena. doi: <https://repositorio.upse.edu.ec/server/api/core/bitstreams/45d3be13-17b5-40e2-a07a-69c4193a5ab7/content>
- Soto, J., Julio, A., Crespo, L., Borbor, G. y Borbor, V. (2016). Efecto de la inoculación de bacterias nativas en dos híbridos de maíz (*Zea mays* L.), provincia de Santa Elena. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 3(2), pp. 50–60. Disponible en: DOI: <https://doi.org/10.26423/rctu.v3i2.154>.
- Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R. and Polasky, S. (2002) 'Agricultural sustainability and intensive production practices', *Nature*, 418(6898), pp. 671–677. doi:10.1038/nature01014.
- Vejan, P., Abdullah, R., Khadiran, T., Ismail, S. and Nasrulhaq Boyce, A. (2016) 'Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability—A review', *Molecules*, 21(5), p. 573. doi:10.3390/molecules21050573.
- Aloo, B.N., Makumba, B.A., Tumuhairwe, J.B. and Makumba, B. (2023) 'Plant growth-promoting rhizobacteria in brassica production: current status and future prospects', *Sustainability*, 15(1), p. 114. doi:10.3390/su15010114.
- Acurio Vásquez, R.D., Mamarandi Mossot, J.E., Ojeda Shagñay, A.G., Tenorio Moya, E.M., Chiluisa Utreras, V.P. and Vaca Suquillo, I.M. (2020) 'Evaluación de *Bacillus* spp. como rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en brócoli y lechuga', *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 21(3), e1465. doi: <https://doi.org/10.21930>

- Flores Clavo, R., Valladolid-Suyón, E., Reinoza-Farroñan, K., Asmat Ortega, C., Riboldi Monteiro, P.H., Apaza-Castillo, G., Zuñiga-Valdera, G., Fantinatti Garboggini, F., Iglesias-Osores, S. and Carreño-Farfán, C.R. (2023) 'Rhizobacterial isolates from *Prosopis limensis* promote the growth of *Raphanus sativus* L. under salt stress', *Current Microbiology*, 80, p. 269. doi:10.1007/s00284-023-03379-w.
- Carvajal-Muñoz, J.S. and Carmona-García, C.E. (2012) 'Benefits and limitations of biofertilization in agricultural practices', *Livestock Research for Rural Development*, 24(3). doi: <http://www.lrrd.org/lrrd24/3/carv24043.htm>
- Posada, A., Mejía, D., Polanco-Echeverry, D. and Cardona, J. (2021) 'Rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR): una revisión sistemática 1990–2019', *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 12(2), pp. 161–178. doi:10.22490/21456453.4040.
- Glick, B.R. (2014) 'Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world', *Microbiological Research*, 169(1), pp. 30–39. doi:10.1016/j.micres.2013.09.009.
- Backer, R., Rokem, J.S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian, S. and Smith, D.L. (2018) 'Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmaps to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture', *Frontiers in Plant Science*, 9, p. 1473. doi:10.3389/fpls.2018.01473.
- Nadeem, S.M., Ahmad, M., Zahir, Z.A., Javaid, A. and Ashraf, M. (2014) 'The role of mycorrhizae and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in improving crop productivity under stressful environments', *Biotechnology Advances*, 32(2), pp. 429–448. doi:10.1016/j.biotechadv.2013.12.005.
- Khan, S., Shahid, M., Khan, M.S., Syed, A., Bahkali, A.H., Elgorban, A.M. and Pichtel, J. (2020) 'Fungicide-tolerant plant growth-promoting rhizobacteria mitigate physiological disruption of white radish', *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(19), p. 7251. doi:10.3390/ijerph17197251.
- Bashan, Y. and de-Bashan, L.E. (2020) 'How the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* promotes plant growth — a critical assessment', *Advances in Agronomy*, 108, pp. 77–136. doi: [10.1016/S0065-2113\(10\)08002-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08002-8).

- Sharma, S.B., Sayyed, R.Z., Trivedi, M.H. and Gobi, T.A. (2013) 'Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils', *SpringerPlus*, 2, p. 587. doi:10.1186/2193-1801-2-587.
- Alori, E.T., Glick, B.R. and Babalola, O.O. (2017) 'Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture', *Frontiers in Microbiology*, 8, p. 971. doi:10.3389/fmicb.2017.00971.
- Mahanty, T., Bhattacharjee, S., Goswami, M., Bhattacharyya, P., Das, B., Ghosh, A. and Tribedi, P. (2017) 'Biofertilizers: a potential approach for sustainable agriculture development', *Environmental Science and Pollution Research*, 24(4), pp. 3315–3335. doi:10.1007/s11356-016-8104-0.
- Chaudhary, P., Sharma, A., Singh, B. and Nagpal, A.K. (2022) 'Biofertilizers and their impacts on soil fertility and crop productivity', *Microbiological Research*, 259, p. 127017. doi:10.1016/j.micres.2022.127017.
- Gouda, S., Kerry, R.G., Das, G., Paramithiotis, S., Shin, H.S. and Patra, J.K. (2018) 'Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture', *Microbiological Research*, 206, pp. 131–140. doi:10.1016/j.micres.2017.08.016.
- Warthen, R., Cabales, A., Wockenfuss, A., Kaur, C., Kunjapur, A.M. y Bais, H., 2026. Glutamate facilitates root colonization by plant growth-promoting rhizobacteria *Bacillus subtilis* in tomato seedlings. *Microbiology Spectrum*, 14(4), e03181-25. Disponible en: <https://doi.org/10.1128/spectrum.03181-25>.
- Soto-Valenzuela, J., Andrade-Yucailla, V., Solís-Lucas, L., Vera-Rodríguez, J., Muyudumbay, A. & Perero-Perero, A. (2026). Rhizospheric PGPR in corn plants: effects of *Pantoea dispersa*. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, 43(1). doi: [10.47280/RevFacAgron\(LUZ\).v43.n1.IX](https://doi.org/10.47280/RevFacAgron(LUZ).v43.n1.IX)
- Hossain, T.J., 2026. Genome analysis of *Pantoea dispersa* PGPR-24 reveals key genetic pathways for plant growth promotion, root colonization and nutrient mobilization. Preprint, University of Chittagong. doi: <https://doi.org/10.17632/N7FJW6HVZ2.1>
- Aloo, B.N., Makumba, B.A., Mbega, E.R. y Makumba, B.W. (2022) 'The potential of Bacilli rhizobacteria for sustainable crop production and environmental sustainability', *Microbiological Research*, 259, 127016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2018.10.011>

- Colla, G. y Rouphael, Y., 2024. Editorial: Biostimulants in agriculture II: towards a sustainable future. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1427283. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1427283>
- Carrión Cabrera, D.S. (2020) *Evaluación de la aplicación de bacterias promotoras de crecimiento, sobre la fisiología y productividad de pastos*. Tesis de grado. Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador. doi: <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/20.500.11962/26876>
- Chevez Lay, N.L. (2025) *Caracterización de cepas bacterianas tipo PGPR obtenidas de la rizosfera de cultivos vegetales de la parroquia Manglaralto, provincia de Santa Elena*. Tesis de grado. Universidad Estatal Península de Santa Elena. Disponible en: [Repositorio UPSE](#)
- Rojas, J., Pérez, M. y Herrera, L. (2023) ‘Uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal para mejorar el rendimiento de cultivos hortícolas’, *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 17(2), 1–12.
- Gomez, K.A. and Gomez, A.A. (1984). *Statistical Procedures for Agricultural Research*. [online] John Wiley & Sons. doi: <https://www.wiley.com/en-us/shop/general-introductory-agriculture/statistical-procedures-for-agricultural-research-2nd-edition-p-9780471870920#aboutauthors-section>
- Montgomery, D.C. (2019). *Design and Analysis of Experiments*. [online] doi: <https://www.wiley.com/en-us/shop/general-introductory-industrial-engineering/design-and-analysis-of-experiments-10th-edition-p-9781119492443> [
- Rojas, M., Pérez, L. y Castillo, J. (2021). *Respuesta de cultivos hortícolas a la inoculación con bacterias promotoras del crecimiento vegetal*. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 15(2), pp. 210–220.
- Paredes, J. and Cedeño, M. (2022). *Evaluación de bacterias promotoras del crecimiento en cultivos hortícolas*. *Revista Científica Agroecosistemas*, 10(3), pp. 45–53.
- Suman, A., Yadav, A.N. & Verma, P. (2016) ‘Endophytic microbes in crops: diversity and beneficial impact for sustainable agriculture’, in Singh, D.P., Singh, H.B. & Prabha, R. (eds.) *Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity*. Singapore: Springer, pp. 117–143. doi: 10.1007/978-81-322-2647-5_7.
- Dastogeer, K.M.G., Yasuda, M. & Okazaki, S. (2022) ‘Microbiome and pathobiome analyses reveal changes in community structure by foliar pathogen infection in rice’, *Frontiers in Microbiology*, 13, 949152. DOI: 10.3389/fmicb.2022.949152.
- FAO (1986) *Irrigation water management: Irrigation water needs*. Training Manual No. 3. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

ANEXOS

Anexo 1: Tablas de análisis ANOVA

Nueva tabla : 24/6/2026 - 3:14:20 - [Versión : 30/4/2020]

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media D.E.	W*	p(Unilateral D)
SEMANA 1	18	2,330,71	0,84	0,0092
SEMANA 2	18	4,871,97	0,89	0,0792
SEMANA 3	18	8,192,74	0,89	0,1073
SEMANA 4	18	12,364,01	0,86	0,0230
SEMANA 5	18	17,405,59	0,85	0,0179

Nueva tabla: 24/6/2026 - 3:20:28 - [Versión: 30/4/2020]

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media D.E.	W*	p(Unilateral D)
N DE HOJAS	18	8,202,03	0,89	0,1028
DIAMETRO	18	3,020,51	0,88	0,0571
LONGITUD	18	7,851,27	0,86	0,0230
PESO FRESCO	18	22,666,33	0,86	0,0242

Nueva tabla : 24/6/2026 - 3:22:35 - [Versión : 30/4/2020]

Análisis de la varianza

SEMANA 1

Variable	N	R ²	R ² Aj CV
SEMANA 1	18	0,98	0,974,91

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	8,46	7	1,21	92,18	<0,0001
REPETICION	0,13	2	0,07	5,11	0,0296
TRATAMIENTO	8,33	5	1,67	127,01	<0,0001
Error	0,13	10	0,01		
Total	8,59	17			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,32473

Error: 0,0131 gl: 10

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
T4	3,09	3	0,07 A
T5	2,96	3	0,07 A
T3	2,77	3	0,07 A

T2	2,15	3	0,07	B
T1	1,85	3	0,07	B
T0	1,17	3	0,07	C

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

SEMANA 2

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
SEMANA 2	18	0,83	0,72	21,52

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	54,80	7	7,83	7,11	0,0032
REPETICION	1,64	2	0,82	0,75	0,4984
TRATAMIENTO	53,16	5	10,63	9,66	0,0014
Error	11,00	10	1,10		
Total	65,81	17			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=2,97491

Error: 1,1004 gl: 10

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.			
T4	7,78	3	0,61	A		
T5	5,97	3	0,61	A	B	
T3	5,24	3	0,61	A	B	C
T2	4,23	3	0,61		B	C
T1	3,58	3	0,61		B	C
T0	2,45	3	0,61			C

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

SEMANA 3

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
SEMANA 3	18	0,98	0,97	5,88

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	125,40	7	17,91	77,30	<0,0001
REPETICION	0,26	2	0,13	0,56	0,5895
TRATAMIENTO	125,14	5	25,03	107,99	<0,0001
Error	2,32	10	0,23		
Total	127,72	17			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,36525

Error: 0,2318 gl: 10

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.			
T5	11,24	3	0,28	A		
T4	11,13	3	0,28	A		
T3	9,25	3	0,28		B	
T2	7,48	3	0,28			C

T1	6,07	3	0,28	D
T0	3,98	3	0,28	E

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

SEMANA 4

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
SEMANA 4	18	1,00	1,00	2,25

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	271,95	7	38,85	502,65	<0,0001
REPETICION	0,04	2	0,02	0,27	0,7707
TRATAMIENTO	271,91	5	54,38	703,61	<0,0001
Error	0,77	10	0,08		
Total	272,72	17			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,78842

Error: 0,0773 gl: 10

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.				
T4	17,09	3	0,16	A			
T5	16,19	3	0,16		B		
T3	14,17	3	0,16			C	
T2	11,37	3	0,16				D
T1	9,25	3	0,16				E
T0	6,06	3	0,16				F

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

SEMANA 5

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
SEMANA 5	18	1,00	1,00	0,78

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	530,54	7	75,79	4087,46	<0,0001
REPETICION	0,09	2	0,05	2,48	0,1332
TRATAMIENTO	530,45	5	106,09	5721,45	<0,0001
Error	0,19	10	0,02		
Total	530,73	17			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,38617

Error: 0,0185 gl: 10

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.				
T4	24,01	3	0,08	A			
T5	22,67	3	0,08		B		
T3	20,07	3	0,08			C	
T2	15,72	3	0,08				D
T1	13,46	3	0,08				E

T0	8,46	3	0,08	F
<i>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)</i>				

Nueva tabla : 28/6/2026 - 15:21:29 - [Versión : 30/4/2020]

Análisis de la varianza

N DE HOJAS

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
N DE HOJAS	18	0,97	0,96	5,53

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	77,76	7	11,11	53,33	<0,0001
REPETICION	0,04	2	0,02	0,08	0,9199
TRATAMIENTO	77,72	5	15,54	74,63	<0,0001
Error	2,08	10	0,21		
Total	79,84	17			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,29427

Error: 0,2083 gl: 10

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
T4	11,39	3	0,26	A
T3	10,07	3	0,26	B
T5	8,48	3	0,26	C
T1	7,36	3	0,26	C
T2	7,31	3	0,26	C
T0	4,93	3	0,26	D

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

DIAMETRO

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
DIAMETRO	18	0,91	0,84	6,79

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	4,06	7	0,58	13,99	0,0002
REPETICION	0,12	2	0,06	1,48	0,2729
TRATAMIENTO	3,94	5	0,79	19,00	0,0001
Error	0,41	10	0,04		
Total	4,48	17			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,57750

Error: 0,0415 gl: 10

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
-------------	--------	---	------

T4	3,66	3	0,12	A		
T5	3,34	3	0,12	A	B	
T3	3,27	3	0,12	A	B	
T1	2,88	3	0,12		B	C
T2	2,51	3	0,12			C
T0	2,34	3	0,12			C

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

LONGITUD

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
LONGITUD	18	0,98	0,97	2,64

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	24,68	7	3,53	83,49	<0,0001
REPETICION	0,02	2	0,01	0,25	0,7814
TRATAMIENTO	24,66	5	4,93	116,78	<0,0001
Error	0,42	10	0,04		
Total	25,10	17			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,58280

Error: 0,0422 gl: 10

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.			
T4	9,24	3	0,12	A		
T3	8,94	3	0,12	A	B	
T5	8,37	3	0,12		B	
T2	7,13	3	0,12			C
T1	7,12	3	0,12			C
T0	5,90	3	0,12			D

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

PESO FRESCO

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PESO FRESCO	18	0,99	0,98	4,42

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	719,53	7	102,79	105,21	<0,0001
REPETICION	1,33	2	0,67	0,68	0,5271
TRATAMIENTO	718,20	5	143,64	147,03	<0,0001
Error	9,77	10	0,98		
Total	729,30	17			

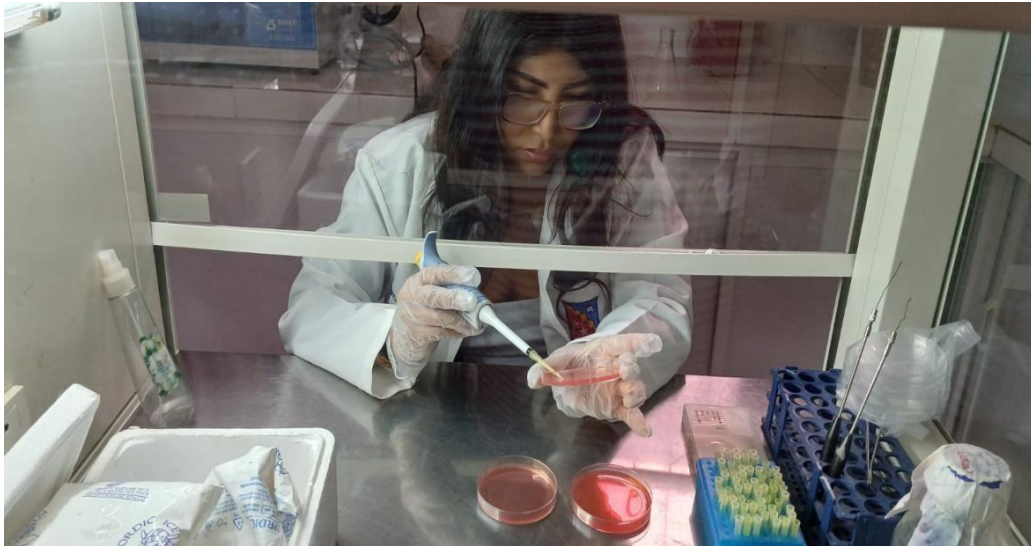
Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=2,80309

Error: 0,9770 gl: 10

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
T4	31,88	3	0,57	A

T3	26,35	3	0,57	B	
T5	25,33	3	0,57	B	
T2	19,32	3	0,57		C
T1	19,14	3	0,57		C
T0	12,14	3	0,57		D

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



Anexo 2: Siembra de bacterias en cajas Petri.



Anexo 3: Observación de crecimiento *Bacillus subtilis*.



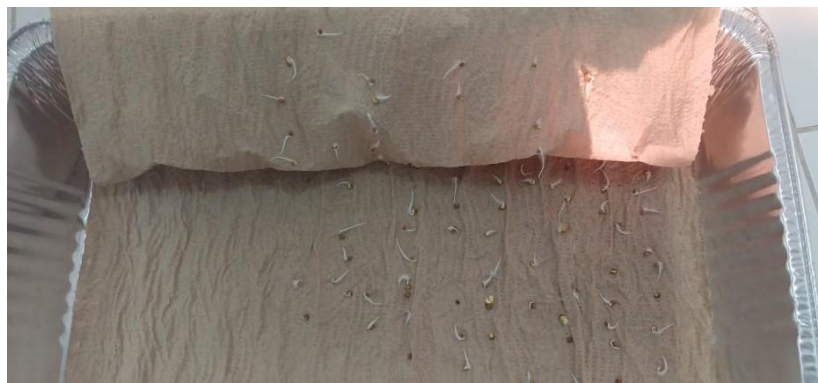
Anexo 4: Observación de crecimiento *Pantoea dispersa*



Anexo 6: Caldo de bacterias en tubos de cultivo para su multiplicación



Anexo 5: Semillas inoculadas dentro de la Incubadora



Anexo 7: Germinación de semillas inoculadas



Anexo 8: Observación del crecimiento de plántulas



Anexo 9: Arado con
mecanización



Anexo 10: Delimitando área del terreno



Anexo 11: Siembra de semillas



Anexo 12: Crecimiento de plantas de rábano



Anexo 13: Cosecha de rábanos