

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE POSGRADO

PROYECTO DE TITULACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

“MAGÍSTER EN ESTADÍSTICA APLICADA”

TEMA:

EVALUACIÓN DE UN BIOFERTILIZANTE ENRIQUECIDO CON *PAENIBACILLUS*
POLYMYXA Y *TRICHODERMA SP.* APLICADO EN *RAPHANUS SATIVUS L.*,
DESDE UNA PERSPECTIVA MULTIVARIANTE DE TRES-VÍAS

AUTOR:

MARCELA MARICELA CARPIO ARIAS

Guayaquil - Ecuador

2024

RESUMEN

Este estudio se centró en evaluar la eficacia de diversos tratamientos de biofertilizantes en el crecimiento y desarrollo de *Raphanus sativus* L.. El objetivo principal fue determinar cuáles tratamientos optimizan las variables de crecimiento vegetal, como la altura, el diámetro del bulbo y la producción de biomasa. Se aplicó un diseño experimental con diferentes biofertilizantes y se evaluaron las respuestas de las plantas mediante un conjunto de variables agronómicas.

Para el análisis de los datos, se emplearon métodos estadísticos no paramétricos, incluyendo el test de Kruskal-Wallis y el test de Wilcoxon para muestras emparejadas. Estos enfoques permitieron identificar diferencias significativas entre los tratamientos sin asumir distribuciones normales en los datos. Los resultados indicaron que el tratamiento con *Paenibacillus polymyxa* y *Trichoderma* sp. mostró un impacto significativo en el aumento de la biomasa y el diámetro del bulbo, mientras que otros tratamientos favorecieron el crecimiento en altura de la planta.

Estos hallazgos sugieren que la combinación de biofertilizantes podría ser una alternativa viable y sostenible para mejorar el rendimiento del cultivo, optimizando el uso de recursos naturales y minimizando el impacto ambiental.

Palabras clave: biofertilizantes, ANOVA, STATIS, crecimiento vegetal.

ABSTRACT

This study was focused on evaluating the efficacy of various biofertilizer treatments on the growth and development of *Raphanus sativus L.*. The main objective was to determine which treatments optimize plant growth variables such as height, bulb diameter and biomass production. An experimental design with different biofertilizers was applied and plant responses were evaluated using a set of agronomic variables.

For data analysis, nonparametric statistical methods were employed, including the Kruskal-Wallis test and the Wilcoxon test for paired samples. These approaches allowed the identification of significant differences between treatments without assuming normal distributions in the data. The results indicated that treatment with *Paenibacillus polymyxa* and *Trichoderma sp.* showed a significant impact on the increase in biomass and bulb diameter, while other treatments favored plant height growth.

These findings suggest that the combination of biofertilizers could be a viable and sustainable alternative to improve crop yield, optimizing the use of natural resources and minimizing environmental impact.

Key words: biofertilizers, ANOVA, STATIS, plant growth.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi hijo y a toda mi familia, quienes me inspiran y enseñan cada día. A mi hijo y a mi esposo, que me muestran la importancia de la perseverancia, la tolerancia y de encontrar alegría en los pequeños momentos de la vida.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más profundo agradecimiento a la voluntad de Dios, que me ha permitido llegar hasta este momento, superando innumerables desafíos. Agradezco de corazón a la PhD. Purificación Galindo por su infinita paciencia y dedicación, y a mi tutora, Mariela González, por ser un apoyo invaluable a lo largo de mi formación.

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad por los hechos y doctrinas expuestas en este Proyecto de Titulación, me corresponde exclusivamente y ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría. El patrimonio intelectual del mismo, corresponde exclusivamente a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Maricela Carpio Arias

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Luis Pilacuan Bonete, PhD.

PRESIDENTE

Mariela González Narváez, PhD.

TUTOR

Francisco Moreira Villegas, Mgtr.

DOCENTE EVALUADOR

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Descripción del problema.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo General.....	3
1.3.2. Objetivos Específicos.....	3
1.4. Hipótesis.....	3
1.5. Alcance.....	4
CAPÍTULO 2.....	5
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Agricultura Intensiva.....	5
2.2. Agricultura Regenerativa.....	6
2.3. <i>Paenibacillus polymyxa</i>	7
2.4. <i>Trichoderma sp.</i>	7
2.5. Fertilizante.....	8
2.6. Biofertilizantes.....	8
2.7. Evaluación de la eficacia de los biofertilizantes.....	8
2.8. Las mejoras esperadas en la salud del suelo y el rendimiento del rábano 10	
2.9. Comparación del biofertilizante con los fertilizantes químicos tradicionales en términos de impacto ambiental.....	10
2.10. ANOVA.....	11
2.11. STATIS.....	12

.....	14
2.11.1. Estandarización de los Datos.....	14
2.11.2. Escalamiento Total de Bouroche (1975).....	15
2.11.3. Cálculo del STATIS.....	15
2.12. Test de Kruskal-Wallis.....	16
3. METODOLOGÍA.....	17
3.1. Tipo y Diseño de la investigación.....	17
3.2. Población y Muestra.....	18
3.2.1. Preparación del biofertilizante a base de estiércol porcino.....	20
3.3. Métodos y Técnicas.....	21
CAPÍTULO 4.....	23
4. RESULTADOS.....	23
4.1. ANOVA.....	23
4.2. Contraste de Kruskal-Wallis.....	28
4.3. STATIS.....	35
4.3.1. Interstructure (Interestructura).....	35
4.3.2. Compromise (Compromiso).....	37
4.3.3. Intraestructura.....	42
CAPÍTULO 5.....	45
CONCLUSIONES.....	45
RECOMENDACIONES.....	46
Referencias.....	1

LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.1.	<i>Componentes Clave del ANOVA</i>	12
Figura 2.2.	<i>Esquema del modelo STATIS aplicado al análisis de tratamientos de biofertilizantes.</i>	14
Figura 3.1.	<i>Esquema del biodigestor.</i>	20
Figura 4.1.	<i>Comparación de Tratamientos mediante Boxplots para Variables</i> 32	
Figura 4.2.	<i>Interestructura e Índice de Correlación Vectorial</i>	37
Figura 4.3.	<i>Compromiso</i>	39
Figura 4.4.	<i>Componentes Principales 1 y 2.</i>	40
Figura 4.5.	<i>Relación entre el Peso de las Tablas y Cos^2 de los Tratamientos</i> 42	
Figura 4.6.	<i>Intraestructura.</i>	44
	44

LISTADO DE TABLAS

Tabla 3.1.	<i>Diseño experimental de la investigación realizada.....</i>	18
Tabla 3.2.	<i>Datos meteorológicos de la zona experimental de estudio.</i>	19
Tabla 3.3.	Propiedades físicas y químicas del suelo del lugar de estudio.	19
Tabla 3.4.	<i>Materiales y cantidad necesaria para la elaboración del biofertilizante.</i>	21
Tabla 4.1.	<i>Estadísticos Descriptivos</i>	24
Tabla 4.2.	<i>Verificaciones de Supuestos</i>	27
Tabla 4.3.	<i>Contraste de Kruskal-Wallis</i>	28
Tabla 4.4.	Contraste Wilcoxon para Muestras Emparejadas	30

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El cambio climático, la degradación ambiental y la pérdida de biodiversidad han convertido al suelo en uno de los recursos más amenazados del planeta (Christensen et al., 2004; Kundzewicz et al., 2008; Ajibade et al., 2023). En la actualidad, la agricultura sostenible y la seguridad alimentaria son desafíos cruciales en el mundo (Pretty et al., 2011; Selvaraju et al., 2011). En este contexto, el uso de biofertilizantes para mejorar el rendimiento de los cultivos ha ganado una atención relevante (Lata et al., 2023).

Los biofertilizantes, en particular aquellos enriquecidos con *Paenibacillus polymyxa* y *Trichoderma sp.*, se han identificado como agentes biológicos claves para mejorar la salud del suelo y el rendimiento de los cultivos. Estos microorganismos son conocidos por su capacidad para producir metabolitos secundarios (Sopialena et al., 2021) que pueden estimular el crecimiento de las plantas y reprimir el crecimiento de patógenos, como los hongos y bacterias que a menudo encontramos en plantas y en suelos cultivados (Timmusk et al., 2005; Prasetyani, 2023), los microorganismos pueden jugar un papel vital en la mejora de la salud del suelo y el rendimiento de los cultivos.

El rábano (*sativus L.*) ha mostrado una respuesta positiva a la aplicación de estos biofertilizantes. Sin embargo, es fundamental entender cómo estos biofertilizantes afectan el rendimiento del cultivo y la concentración de nutrientes en las partes comestibles de las plantas, y cómo estos efectos pueden optimizarse para diferentes condiciones del suelo.

El uso de biofertilizantes tiene un efecto positivo en el rendimiento de las plantas, al mismo tiempo, se conoce que su funcionamiento depende del sustrato de elaboración. Un estudio realizado por Beykkhormizi et al.(2016) sobre el efecto de un fertilizante orgánico (vermicompost) en algunas características morfológicas, fisiológicas y bioquímicas del frijol

(*Phaseolus vulgaris* L.) bajo estrés por salinidad, reveló una reducción en la altura de la planta, el área foliar y la clorofila. Sin embargo, se observó que las enmiendas de vermicompost mejoraron significativamente los efectos negativos de la salinidad tanto en condiciones de estrés como de no estrés.

Por tanto, este estudio propone evaluar un biofertilizante enriquecido con *Paenibacillus polymyxa* y *Trichoderma* sp. aplicado en *Raphanus sativus* L., desde una perspectiva multivariante de tres vías. Este método proporcionará una mayor claridad, permitiendo investigar cómo estos biofertilizantes pueden utilizarse de manera eficiente para potenciar la agricultura sostenible y reforzar la seguridad alimentaria. Esperamos que, con los resultados de esta investigación, podamos proporcionar una alternativa más sostenible y respetuosa con el medio ambiente en comparación con los métodos convencionales que dependen de pesticidas químicos.

1.2. Descripción del problema

Durante el último siglo, el crecimiento de la población mundial ha impulsado la demanda de sistemas alimentarios y productos agrícolas de alta calidad (Galic et al., 2023; Yilmaz et al., 2023). Esto se puede lograr, si el suelo utilizado para el cultivo objetivo tiene las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas óptimas para permitir el desarrollo de la planta (Badagliacca et al., 2023; Fedorov et al., 2023); no obstante, por la explotación de los suelos esto no ocurre y se hace necesaria la aplicación de fertilizantes sintéticos que proporcionen nutrientes al suelo y aceleren el crecimiento de las plantas (Meena & Busi, 2019; Molina & Matilla, 2020).

Sin embargo, con el paso del tiempo estas aplicaciones tienen efectos nocivos sobre la productividad de los cultivos y la fertilidad del suelo con un mayor riesgo de que presenten: (i) salinidad, (ii) su materia orgánica disminuya, acumulando sustancias tóxicas, (iii) cambios en el pH, lo que lleva al deterioro de la fauna microbiana, existiendo problemas de

biorremediación durante largos periodos de tiempo si las condiciones de la superficie no son óptimas (Chandrasekaran et al., 2021).

Es por esto, que el uso excesivo de fertilizantes químicos es uno de los factores que afectan los parámetros económicos, ambientales y de producción; al mismo tiempo, el contacto físico pone en riesgo la salud humana (Bizos et al., 2020). Debido a los efectos nocivos, los gobiernos y los agricultores están tratando de reducir el uso de agroquímicos en las actividades agrícolas (Liu et al., 2021).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar la efectividad de un biofertilizante enriquecido con *Paenibacillus polymyxa* y *Trichoderma sp.* en el cultivo *Raphanus sativus L.*, mediante la aplicación de métodos multivariantes de la familia STATIS, para la identificación de variaciones en los efectos de crecimiento y desarrollo del cultivo originadas por las diferentes concentraciones y combinaciones del biofertilizante.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Realizar un análisis exploratorio de los datos obtenidos del efecto de un biofertilizante enriquecido con *Paenibacillus polymyxa* y *Trichoderma sp.* sobre el crecimiento y rendimiento de tres variedades de rábano (*Raphanus sativus L.*), para la comprensión de las respuestas de la planta a los diferentes tratamientos.
2. Realizar un ANOVA clásico para identificar diferencias significativas entre los tratamientos del Biofertilizante.
3. Aplicar el método multivariante de la familia STATIS, para la identificación de las variaciones en la efectividad del Biofertilizante.
4. Comparar los resultados y beneficios de la aplicación de las técnicas ANOVA y STATIS en un Diseño Experimental.

1.4. Hipótesis

Los métodos multivariantes de tres-vías permiten identificar los tratamientos que presentan diferencias-variaciones en la evaluación de

la efectividad de un Biofertilizante sobre el crecimiento y el rendimiento de un cultivo.

1.5. Alcance

Esta investigación ésta orientada al análisis e identificación de los tratamientos que permitan obtener la efectividad de un biofertilizante en un cultivo de rábano. Los datos para el desarrollo de este estudio provienen de un Diseño experimental que fue desarrollado en la época de invierno del 2023, en condiciones de campo, en el Recinto Nuevo Porvenir del Cantón Chillanes en Ecuador. Estos resultados pueden servir como un referente para realizar mejoras o emular el diseño experimental en otros tipos de cultivos o regiones en Ecuador.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

La utilización de biofertilizantes enriquecidos con microorganismos beneficiosos ha ganado una atención significativa en las prácticas agrícolas debido a su potencial para mejorar la salud del suelo y el rendimiento de los cultivos al tiempo que minimiza el impacto ambiental (Xu et al., 2001). Los estudios que evalúan la eficacia de biofertilizantes con la utilización de materia orgánica fermentada (Bokashi) y organismos unicelulares con alto contenido de vitaminas minerales y proteínas (Spirulina) en cultivos de pimiento han demostrado mejoras significativas tanto en el contenido de nutrientes del suelo como en los parámetros de crecimiento de las plantas (Patil, 2024).

2.1. Agricultura Intensiva

La agricultura intensiva se caracteriza por el cultivo en condiciones y ambientes altamente controlados, utilizando maquinaria avanzada para maximizar la productividad y el desarrollo de los cultivos. Su objetivo principal es lograr la máxima eficiencia en el uso de recursos disponibles, optimizando los procesos de cultivo para obtener los mayores rendimientos posibles (Cuadras et al., 2021). El proceso de globalización y el aumento de la agricultura industrial han llevado a una sustitución significativa de la mano de obra por insumos químicos y energéticos importados. Este cambio ha alterado profundamente tanto la economía como la estructura social de las comunidades rurales. Además, ha tenido efectos adversos en los recursos vitales como el agua, el aire y el suelo, que son fundamentales para la producción de alimentos y fibras ante una demanda global creciente (Burkart, 2007).

La adopción de prácticas agrícolas intensivas convencionales provoca efectos negativos como el aumento de emisiones de gases de efecto invernadero, la pérdida de biodiversidad y la degradación del suelo, el agua y los ecosistemas. Es imprescindible una transición ecológica en la

agricultura (Heider et al., 2023). Los sistemas agrícolas eficientes pueden aprovechar al máximo los recursos limitados, fomentar un desarrollo agrícola integral y asegurar un crecimiento continuo en la producción agrícola (Liu, 2023).

La agricultura intensiva contribuye a la degradación del suelo y a otros problemas ambientales, como la contaminación, la erosión del suelo, la pérdida de fertilidad, la disminución de la biodiversidad y las emisiones de gases de efecto invernadero, que intensifican el cambio climático. Se han propuesto prácticas agrícolas sostenibles, como la labranza reducida, el cultivo de cobertura y la retención de residuos de cultivos, como soluciones económicas que pueden abordar la degradación del suelo, la seguridad alimentaria y la mitigación y adaptación al cambio climático. Estas prácticas mejoran el secuestro de carbono orgánico del suelo (COS) y aportan beneficios colaterales asociados (Francaviglia et al., 2023).

2.2. Agricultura Regenerativa

La agricultura regenerativa, en contraposición a los modelos convencionales de alta intensidad y monocultivo, propone un enfoque holístico que integra diversidad de cultivos y prácticas sostenibles para revitalizar los recursos agrícolas (Francis et al., 1986). Este modelo enfatiza la optimización de los ciclos naturales dentro de la finca, como la fijación de nitrógeno y la generación de materia orgánica, aprovechando tecnologías y conocimientos locales para incrementar la eficiencia en el uso de los recursos (Kamenetzky & Maybury, 1989). En lugar de depender de insumos costosos y poco sostenibles, la agricultura regenerativa promueve la gestión integrada de plagas, la resistencia genética a estrés y plagas, y un alto nivel de actividad biológica del suelo. Este enfoque contribuye no solo a la productividad agrícola sino también a la sustentabilidad económica y ambiental de las comunidades campesinas, fortaleciendo la autosuficiencia en insumos y la producción de alimentos básicos, y adaptando las prácticas agrícolas a las realidades y recursos locales (Antwerpen et al., 2024).

2.3. *Paenibacillus polymyxa*

Los *Paenibacillus* son bacterias en forma de bastón que pertenece a las rizobacterias, Gram positivas, móviles, y pueden ser tanto anaerobias facultativas como aerobias estrictas (Park et al., 2008). Estas bacterias crecen mejor en condiciones de pH neutro y a temperaturas entre 28°C y 40°C. Inicialmente, se clasificaban dentro del género *Bacillus*, pero los avances en la secuenciación del ARNr 16S han permitido diferenciar bacterias morfológicamente similares en grupos distintos, resultando en la creación del género *Paenibacillus*. Tras su identificación, varias especies de *Paenibacillus* fueron reclasificadas (Patowary & Deka, 2020). Una especie notable es *Paenibacillus polymyxa*, que tiene una gran importancia en la agricultura y la industria debido a su capacidad para promover el crecimiento vegetal y producir diversos metabolitos secundarios relevantes (Lebano et al., 2024). *Paenibacillus polymyxa* produce fusaricidinas, una familia de antibióticos lipopeptídicos que inhiben fuertemente el crecimiento de muchos hongos patógenos de plantas (Li & Jensen, 2008).

2.4. *Trichoderma sp.*

Es un hongo filamentoso, prospera como saprófito en diversos ambientes de sustrato. Su papel es fundamental en la función de los ecosistemas como descomponedores de material orgánico, desempeñando así un papel esencial en el ciclo de nutrientes del suelo (Cortés et al., 2023), además su capacidad para combatir patógenos vegetales directamente o mediante la producción de metabolitos antifúngicos que desencadenan mecanismos de resistencia sistémica inducida. Estudios recientes muestran que *Trichoderma sp.* también induce la promoción del crecimiento de las plantas mediante la secreción de hormonas de crecimiento (Shanavas, 2014; Xia et al., 2024).

2.5. Fertilizante

Para comprender mejor el alcance de la agricultura, es necesario tener cultivos suficientes. Los fertilizantes proporcionan nutrientes que faltan o faltan en el suelo o en los medios de cultivo, mejorando así la productividad de las plantas y permitiendo una mayor producción agrícola. Es importante que los agricultores utilicen adecuadamente los fertilizantes para una agricultura sostenible, lo que garantiza que las plantas reciban todos los nutrientes esenciales necesarios en niveles óptimos, minimizando al mismo tiempo los efectos adversos sobre el medio ambiente (Zaib et al., 2023).

2.6. Biofertilizantes

Los biofertilizantes se refieren a aquellos productos orgánicos que albergan microorganismos de nichos ambientales únicos. Estos microbios poseen la capacidad de solubilizar o metabolizar una amplia gama de compuestos orgánicos e inorgánicos, lo que los hace biodisponibles y fácilmente absorbibles por las plantas a través de sus sistemas de raíces. Además, estos microorganismos pueden formar relaciones simbióticas con otras diversas especies de plantas, así como con otros microbios, que a su vez promueven el crecimiento general de las plantas a través de diversos mecanismos (Jiménez et al., 2023).

2.7. Evaluación de la eficacia de los biofertilizantes

Explorando el impacto de *Paenibacillus polymyxa* y *Trichoderma sp.* sobre el crecimiento y desarrollo del rábano (*Raphanus sativus L.*) requiere una comprensión profunda de cómo estos biofertilizantes influyen en la fisiología de las plantas y la salud del suelo (Sopialena et al., 2021).

Ambos microorganismos son conocidos por sus propiedades beneficiosas en la agricultura. *Paenibacillus polymyxa* mejora la absorción de nutrientes y estimula el crecimiento de las raíces mediante la fijación de nitrógeno, la solubilización de fosfato y la producción de

reguladores del crecimiento de las plantas como el ácido indol-3-acético (IAA) (Park et al., 2008; Al-Quwaie, 2024). De manera similar, *Trichoderma sp.* es un género de hongos reconocido por su papel en el control biológico, mejorando la resistencia de las plantas a los patógenos y potenciando el crecimiento de las raíces mediante la producción de auxinas y otras sustancias promotoras del crecimiento (Shanavas, 2014; Cortés et al., 2023).

La sinergia entre estos microorganismos podría conducir potencialmente a mejoras sustanciales en el rendimiento y la calidad del rábano al promover sistemas de raíces más saludables y mejorar la disponibilidad general de nutrientes en el suelo. La aplicación de biofertilizantes ha sido ampliamente estudiada en diversos cultivos, demostrando mejoras significativas en el rendimiento y la salud de las plantas. Por ejemplo, los estudios sobre el uso de biofertilizantes en variedades de frijol, repollo morado y pimiento han mostrado resultados prometedores en términos de crecimiento y mejora del rendimiento (Morel et al., 2021).

Estos hallazgos subrayan los beneficios potenciales del uso de biofertilizantes en el cultivo de rábanos, donde se podrían anticipar mejoras similares en los parámetros de crecimiento. Además, las pruebas de eficacia realizadas en diversos cultivos, incluidos tomates y maíz, resaltan la importancia de los biofertilizantes en la agricultura sostenible, enfatizando su papel en la mejora de la productividad de los cultivos y la salud del suelo (Navarro, 2021).

Implementando biofertilizantes como *Paenibacillus Polymyxa* y *Trichoderma sp.* en el cultivo de rábanos no sólo contribuye a prácticas agrícolas sostenibles al reducir la dependencia de fertilizantes químicos, sino que también mejora la resiliencia de los cultivos ante el estrés ambiental y los patógenos. Este enfoque integrado puede conducir a una mayor eficacia agronómica, como se demuestra en numerosos ensayos de eficacia realizados en diferentes cultivos (Stellfeldt et al., 2019). Es fundamental realizar pruebas de campo para determinar las tasas y condiciones óptimas de aplicación de estos biofertilizantes en el cultivo

de rábano, asegurando los máximos beneficios y contribuyendo a sistemas agrícolas más sostenibles y productivos.

2.8. Las mejoras esperadas en la salud del suelo y el rendimiento del rábano

Investigaciones similares realizadas sobre el uso de biofertilizantes orgánicos en el cultivo de repollo morado indicaron que estos biofertilizantes no solo mejoran la actividad microbiana del suelo, sino que también mejoran la disponibilidad de nutrientes, lo que conduce a una mejor salud de las plantas y mayores rendimientos (Muñoz, 2018). Además, las pruebas de eficacia en diversos cultivos, incluidos el brócoli y el tomate, han corroborado el impacto positivo de los biofertilizantes en la estructura del suelo, el ciclo de los nutrientes y la productividad general de las plantas (Gaibor, 2011; Navarro, 2021). Estas interconexiones entre la mejora de la salud del suelo y el aumento del rendimiento de los cultivos subrayan la necesidad de integrar biofertilizantes en las prácticas agrícolas. Los beneficios resultantes incluyen no sólo mayores rendimientos sino también prácticas agrícolas más sostenibles, lo que sugiere que una mayor investigación y adopción de biofertilizantes podría contribuir considerablemente a la resiliencia y productividad del sector agrícola.

2.9. Comparación del biofertilizante con los fertilizantes químicos tradicionales en términos de impacto ambiental

Los biofertilizantes, a diferencia de los fertilizantes es una opción más sostenible y respetuosa con el medio ambiente para mejorar la fertilidad del suelo y el rendimiento de los cultivos (Al-Quwaie, 2024). Los agricultores orgánicos prefieren los biofertilizantes porque se alinean con los principios de los procesos naturales, evitando los insumos sintéticos típicos de los fertilizantes químicos y reduciendo significativamente la huella ambiental (Ibáñez et al., 2023). Una de las principales ventajas de

los biofertilizantes es su capacidad para promover la biodiversidad y adaptarse a las condiciones locales, mientras que los fertilizantes químicos a menudo conducen a la degradación ambiental y la alteración de los ecosistemas locales (Ibáñez et al., 2023). Además, la producción de fertilizantes orgánicos generalmente requiere menos energía en comparación con sus homólogos químicos, lo que los convierte en una opción más eficiente desde el punto de vista energético para las prácticas agrícolas (Lata et al., 2023). Económicamente, los biofertilizantes pueden ser más rentables para los agricultores, al reducir la carga financiera asociada con la compra y aplicación de fertilizantes químicos.

Los beneficios a largo plazo de una mejor salud del suelo para la agricultura sostenible son multifacéticos y abarcan una mayor productividad de los cultivos, la resiliencia de los ecosistemas y la sostenibilidad agrícola en general. Un suelo agrícola saludable es fundamental para las prácticas agrícolas sostenibles, ya que forma la base de la que dependen el crecimiento de las plantas y los servicios ecosistémicos.

2.10. ANOVA

El análisis de varianza (ANOVA) es una técnica estadística ampliamente utilizada para determinar si existen diferencias significativas entre las medias de tres o más grupos independientes (Snedecor & Cochran, 1980; Hobbs et al., 2024). ANOVA se basa en el contraste de hipótesis, donde se formula una hipótesis nula (H_0) y una hipótesis alternativa (H_a). **Hipótesis Nula (H_0):** Las medias de todos los grupos son iguales, es decir, cualquier diferencia observada entre ellas se debe al azar y no a una causa específica.

Hipótesis Alternativa (H_a): Al menos una de las medias es diferente, lo que sugiere la existencia de una variabilidad no atribuible al azar.

Para facilitar la comprensión y el análisis de los resultados, se utiliza una tabla de ANOVA que organiza esta descomposición en términos de suma

de cuadrados, grados de libertad, cuadrados medios y el estadístico F. A continuación, en la Tabla 2.1, se presenta la estructura típica de una tabla ANOVA, la cual resume estos cálculos y facilita la interpretación estadística de los resultados.

Figura 2.1. Componentes Clave del ANOVA

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Factor	$SS_F = \sum_{i=1}^k n_i \cdot (\bar{y}_i - \bar{y})^2$	$k - 1$	$MSE_F = \frac{SS_F}{k - 1}$	$F = \frac{MSE_F}{MSE_E}$
Error	$SS_E = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$	$N - k$	$MSE_E = \frac{SS_E}{N - k}$	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2$	$N - 1$		

Donde:

- n_i : Tamaño de la muestra para el grupo i .
- N : Número total de observaciones.
- k : Número de grupos diferentes en el análisis de la varianza.
- y_{ij} : Valor de la observación j en el grupo i
- \bar{y}_i : Media de las observaciones en el grupo i
- \bar{y} : es la media de todos los datos analizados.

2.11. STATIS

El análisis multivariante STATIS (Plantes, 1976), una extensión del Análisis de Componentes Principales (PCA), diseñado para manejar múltiples tablas de datos. Esta poderosa herramienta permite el análisis de conjuntos de variables medidas en las mismas observaciones. Comienza por comparar y analizar las relaciones entre los diferentes conjuntos de datos. A partir de este análisis, se generan ponderaciones óptimas utilizadas para calcular una estructura común llamada "compromiso" (Marques et al., 2000). Esta combinación lineal de las

tablas de datos representa la información común a las diferentes tablas de una forma que se puede analizar mediante PCA (Menacho, 2009). Luego, cada conjunto de datos original se proyecta sobre el compromiso para analizar sus similitudes y diferencias.

Para el análisis STATIS, manejamos un conjunto de datos representados por K tablas centradas, denotadas como X_1, \dots, X_k . Cada tabla está compuesta por matrices de datos con P_k variables cuantitativas observadas en el mismo grupo de n individuos. Es importante destacar que las variables pueden ser diferentes en cada una de las tablas. Así, las notaciones empleadas son las siguientes:

K : Número de tablas.

n : Número de individuos por tabla.

P_k : Número de variables en la tabla k .

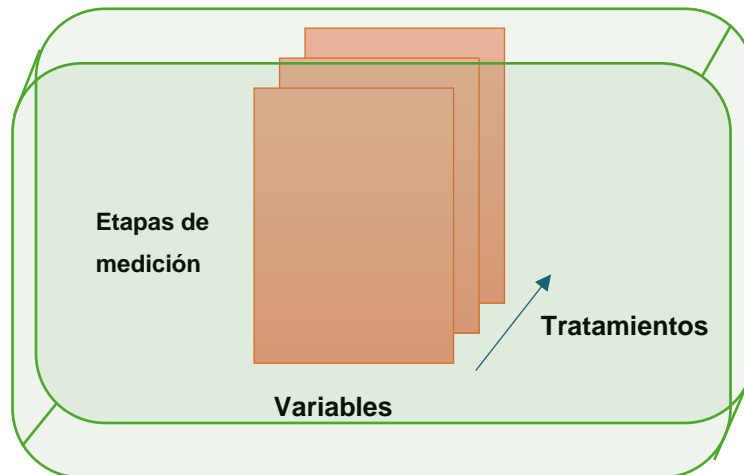
X_k : Tabla de datos k centrada, formada por n individuos y P_k variables.

X : Tabla global resultante de la yuxtaposición de las K tablas X_k .

Adicionalmente, utilizamos una matriz diagonal D de orden $n \times n$, donde los elementos de la diagonal son los pesos de los individuos, definidos como p_1, \dots, p_n con la condición $\sum_{i=1}^n p_i = 1$. Asumimos que los individuos tienen el mismo peso en cada una de las tablas.

Para cada tabla k , tenemos una matriz diagonal M_k de orden $P_k \times P_k$ que contiene los pesos de las variables de esa tabla. Los pesos de las variables para la tabla k -ésima se denotan como $m_1^k, m_2^k, m_{P_k}^k$, sujetos a $\sum_j m_j^k \neq 0$ la condición para todo j .

Figura 2.2. Esquema del modelo STATIS aplicado al análisis de tratamientos de biofertilizantes.



2.11.1. Estandarización de los Datos

Antes de aplicar el Análisis de Componentes Principales (PCA) normalizado, es esencial estandarizar los datos para garantizar que las variables seleccionadas, como la **altura de la planta, diámetro del bulbo, peso del bulbo, número de hojas y área foliar**, tengan un peso equitativo en el análisis, independientemente de sus unidades de medida. Este proceso implica ajustar los datos alrededor de una media de cero y estandarizar la varianza a uno, lo que permite una comparación justa entre las variables y facilita la identificación de patrones subyacentes.

Las variables seleccionadas representan las dimensiones claves sobre las cuales se implementa el PCA normalizado. La normalización de estas variables es un paso crítico para minimizar el sesgo que podrían introducir diferencias en la escala de las mediciones, y contribuye a la precisión del modelo estadístico. Mediante la aplicación del PCA normalizado, los datos se transforman en un conjunto de valores de componentes principales, lo que no solo reduce la dimensionalidad de los datos, facilitando su visualización e interpretación, sino que también ayuda a resaltar las relaciones más significativas y las tendencias latentes entre los diferentes tratamientos de biofertilizantes.

2.11.2. Escalamiento Total de Bouroche (1975)

Para estandarizar los datos multivariantes se aplicó el **Escalamiento Total de Bouroche**, un proceso en dos fases que asegura la comparabilidad entre las distintas tablas de datos correspondientes a cada tiempo de medición. Inicialmente, cada variable fue centrada y escalada individualmente para obtener una media de 0 y una varianza de 1. Posteriormente, las tablas correspondientes a cada tiempo de medición se normalizaron dividiendo cada valor por la desviación estándar global de su columna correspondiente, logrando así una varianza total unificada de uno para cada tabla. Este enfoque de estandarización es fundamental para neutralizar la influencia de la escala original de los datos y asegurar que las diferencias en los resultados reflejen verdaderamente los efectos de los tratamientos y no simplemente las diferencias en la escala de medición.

2.11.3. Cálculo del STATIS

Se utilizará el método **STATIS** para analizar la estructura multivariante de los datos obtenidos de los experimentos con **Raphanus sativus L.** El análisis de interestructura permitirá identificar qué tablas, correspondientes a los diferentes tiempos de medición, presentaban estructuras similares en términos de la respuesta de las plantas a los tratamientos. Por otro lado, el compromiso representó la estructura promedio de las puntuaciones, proporcionando una visión general de cómo los tratamientos influyen en el crecimiento de las plantas a lo largo del tiempo.

Los pesos y el consenso de cada tabla se graficaron para visualizar la contribución de cada tabla a la solución global, permitiendo una comprensión más profunda de cómo cada tiempo de medición aporta información al modelo global. Además, se calculó el porcentaje de varianza explicado por cada componente en la interestructura y el compromiso, lo que proporcionó una idea clara de las dimensiones más

influyentes en el análisis. Finalmente, se proyectó la información de cada tabla sobre la estructura de compromiso, permitiendo analizar cómo cada tabla contribuye a la solución global y facilitando la identificación de patrones de comportamiento comunes o divergentes entre los tratamientos de biofertilizantes.

2.12. Test de Kruskal-Wallis

El **test de Kruskal-Wallis** es una prueba estadística no paramétrica utilizada para comparar las medianas de tres o más grupos independientes. Este test es una extensión del test de Mann-Whitney y se utiliza cuando los datos no cumplen con los supuestos de normalidad o de homogeneidad de varianzas requeridos por el ANOVA. En lugar de comparar medias, como lo hace el ANOVA, Kruskal-Wallis compara las distribuciones de las muestras y evalúa si al menos una de ellas difiere significativamente de las demás. El resultado del test se basa en el rango de los datos y proporciona un estadístico H, que sigue una distribución chi-cuadrado, permitiendo determinar si las diferencias observadas son estadísticamente significativas (McKight & Najab, 2010).

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y Diseño de la investigación

La presente investigación se clasifica como un estudio cuantitativo de tipo experimental. El objetivo principal es evaluar la efectividad de un biofertilizante enriquecido con *Paenibacillus polymyxa* y *Trichoderma sp.* en el cultivo *Raphanus sativus L.* Para ello, se utilizarán métodos multivariantes de la familia STATIS, los cuales permitirán identificar las variaciones en los efectos de crecimiento y desarrollo del cultivo originadas por las diferentes concentraciones y combinaciones del biofertilizante. Este enfoque permitirá detectar patrones y similitudes en las respuestas del cultivo a las distintas formulaciones del biofertilizante.

El experimento se llevó a cabo durante marzo y abril de 2023. La preparación del suelo se realizó de forma manual, empezando con la eliminación de malezas y la remoción del suelo utilizando un pico. Posteriormente, se utilizó un rastrillo para alcanzar una uniformidad en la superficie del suelo, finalizando con la nivelación del terreno. El experimento se realizó utilizando un diseño de arreglo factorial 3x4 con dos factores: el tipo de variedad de rábano y el biofertilizante. Factor 1 (Tipo de variedad de rábano) incluyó tres niveles: 'Scarlet champion', 'Crimson giant' y 'Reggae rábano'. Factor 2 (Biofertilizante) se dividió en cuatro niveles: control, biofertilizante al 10%, biofertilizante al 10% + *Trichoderma sp.*, y biofertilizante al 10% + *Paenibacillus polymyxa*. Cada combinación de estos factores dio lugar a un total de 12 tratamientos diferentes, sumando un total de 60 unidades experimentales, como se detalla en la Tabla 3.1. Las variables respuesta evaluadas fueron altura de la planta, diámetro del bulbo, peso del bulbo, número de hojas, y área foliar en parcelas de 1 x 0.50 m, según se detalla en la Tabla 3.1. Las semillas de diferentes variedades de *Raphanus sativus L.* fueron plantadas manteniendo una distancia de 10 cm entre cada planta y 20

cm entre hileras, colocando una semilla por hoyo. Esto resultó en una densidad de 15 plantas por unidad experimental, alcanzando un total de 900 plantas en toda el área.

Tabla 3.1. *Diseño experimental.*

C.	Variedad	Dosis	F. (días)	R.	T.U. E
TR-A	Scarlet champion	Control	0	5	15
TR-B	Crimson giant	Control	0	5	15
TR-C	Reggae rábano	Control	0	5	15
TR-D	Scarlet champion	Biofertilizante 10%	7-12-17	5	15
TR-E	Crimson giant	Biofertilizante 10%	7-12-17	5	15
TR-F	Reggae rábano	Biofertilizante I 10%	7-12-17	5	15
TR-G	Scarlet champion	Biofertilizante 10% + <i>Trichoderma sp</i>	7-12-17	5	15
TR-H	Scarlet champion	Biofertilizante 10% + <i>Paenibacillus polymyxa</i>	7-12-17	5	15
TR-I	Crimson giant	Biofertilizante 10% + <i>Trichoderma sp</i>	7-12-17	5	15
TR-J	Crimson giant	Biofertilizante 10% + <i>Paenibacillus polymyxa</i>	7-12-17	5	15
TR-K	Reggae rábano	Biofertilizante 10% + <i>Trichoderma sp</i>	7-12-17	5	15
TR-L	Reggae rábano	Biofertilizante 10% + <i>Paenibacillus polymyxa</i>	7-12-17	5	15

Nota: C: código; F: Frecuencia; R: Repeticiones; T.U.E: tamaño de la unidad experimental.

3.2. Población y Muestra

El experimento se llevó a cabo en condiciones de campo en el Recinto Nuevo Porvenir, ubicado en el Cantón Chillanes, Ecuador. Los datos meteorológicos recogidos durante el experimento están presentados en la Tabla 3. 2. Se probaron tres variedades comerciales de semillas de rábano (*Raphanus sativus L.*), específicamente las variedades *Scarlet Champion*, *Crimson Giant* y *Reggae Rábano*, todas con un periodo vegetativo de 32 días. Además, el estudio incorporó el uso de un biofertilizante a base de estiércol porcino, enriquecido con cepas de

Paenibacillus polymyx y *Trichoderma* sp., suministradas por el Laboratorio de Microbiolab de Quito, Ecuador.

Tabla 3.2. Datos meteorológicos de la zona experimental de estudio.

Parámetros	Valor
Latitud	9755579,92
Longitud	706262,4
Altura (msnm)	330.95
Temperatura ambiente máxima (°C)	24,09
Temperatura ambiente mínima (°C)	24,06
Humedad relativa (%)	88,89
Presión atmosférica (hPa)	975,51
Precipitación de lluvia (mm)	0,022

En la Tabla 3.3., se presentan las propiedades físicas y químicas de la muestra de suelo analizada, la cual fue recolectada a una profundidad de 20 cm en el sitio de estudio.

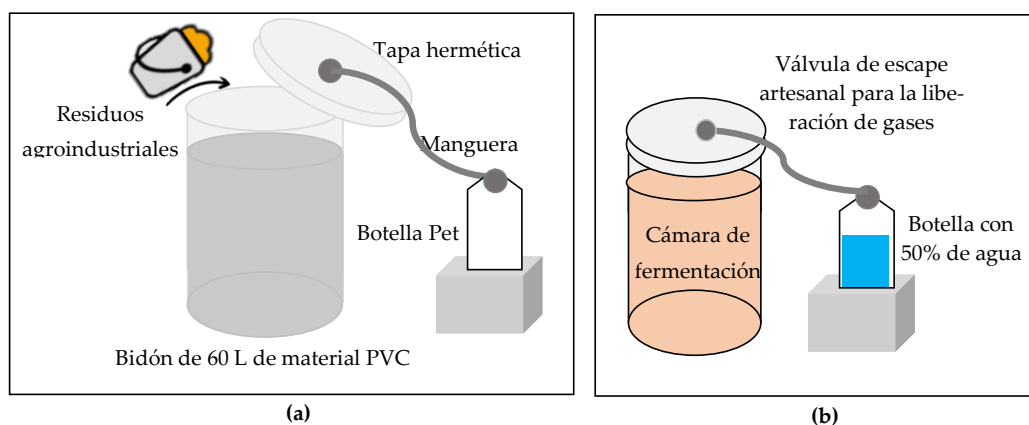
Tabla 3.3. Propiedades físicas y químicas del suelo del lugar de estudio.

Parámetros	Unidades	Valor
pH		5.3
Materia Organica	%	6.35
Nitrogeno (N)	µg/mL	38
Fosforo (P)	µg/mL	4
Potacio (K)	µg/mL	80
Calcio (Ca)	µg/mL	619
Magnesio (Mg)	µg/mL	107
Azufre (S)	µg/mL	1.4
Zinc (Zn)	µg/mL	1.4
Cobre (Cu)	µg/mL	8.7
Hierro (Fe)	µg/mL	151
Manganeso (Mn)	µg/mL	11.0
Boro (B)	µg/mL	0.22

3.2.1. Preparación del biofertilizante a base de estiércol porcino

El biodigestor fue construido manualmente en diciembre de 2022 utilizando un bidón de PVC con una capacidad de 60 litros. Se selló herméticamente el recipiente con una tapa y se ajustó la salida de gases mediante una manguera, la cual se selló con cinta aislante para evitar fugas. Esta manguera fue conectada a una botella PET de 2 litros, como se ilustra en la Figura 3.1.

Figura 3.1. Esquema del biodigestor



Nota: (a) Inicio del diseño del biodigestor; (b) Final del diseño del biodigestor.

Para la preparación del biofertilizante en el biodigestor diseñado se empleó estiércol porcino como material principal, junto con subproductos vegetales enumerados en la Tabla 3.3. La técnica de fermentación anaeróbica utilizada se basó en el método propuesto por Chontal et al. (2019), aunque con ciertas adaptaciones. El proceso fermentativo duró 90 días, realizándose a temperatura ambiente en un espacio al aire libre protegido de la luz solar directa. Además, se realizó una agitación semanal de los materiales para asegurar una fermentación homogénea. Al finalizar la fermentación, se filtró el contenido del biodigestor para obtener únicamente la fracción líquida, la cual se almacenó en recipientes de color ámbar a una temperatura inferior a 4°C.

Tabla 3.4. *Materiales y cantidad necesaria para la elaboración del biofertilizante.*

Material	Cantidad (kg)
Agua	40
Estiércol Porcino	15
Maní Forrajero (<i>Arachis pinto</i>)	3
Plátano (<i>Musa x paradisiaca</i>)	1.5
Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	1.25
Guayaba (<i>Psidium guajava</i>)	1
Suero	1
Ceniza	0.93
Harina de Hueso	0.5
Panela	0.5
Sal en grano	0,5
Levadura	0.1

La inoculación se dio mediante una solución total 7500 mL en las siguientes proporciones 10% (750 mL) de biofertilizante, 89.65 (6723 mL) de agua de riego y 0.35% (26.25 g) de cepas de *Paenibacillus polymyxa* y *Trichoderma sp.*, con una concentración de 1×10^9 UFC/g a una dosis de 700 g x 200 L de agua. Las plantas fueron tratadas por vía edáfica con 100 ml de la solución total del fertilizante orgánico enriquecido con *Paenibacillus polymyxa* y *Trichoderma sp.* a los 7-12-17 días después de la siembra en los diferentes tratamientos.

Para las variedades de rábano, las variables evaluadas fueron porcentaje de supervivencia durante la fertilización (%), la cual fue calculada a partir de un conteo manual del número de plantas sobrevivientes por unidad experimental a los 17 días. La altura de la planta fue medida a los 14, 21 y 32 días (cm), después de la cosecha realizada a los 32 días se evaluó el peso con follaje (kg), diámetro del bulbo (cm) y peso del bulbo (g).

3.3. Métodos y Técnicas

En este estudio se evaluaron diversas variables de crecimiento en variedades de rábano (*Raphanus sativus* L.), utilizando técnicas

estadísticas avanzadas para analizar los efectos del biofertilizante enriquecido con *Paenibacillus polymyxa* y *Trichoderma sp.* El diseño del experimento y el análisis de datos se centraron en métodos multivariantes avanzados, adaptados para explorar las interacciones complejas entre las variables de tratamiento y las respuestas del cultivo.

Para el análisis de los datos, se empleó el enfoque de Análisis de Tres Vías (STATIS), que facilita la comparación y el análisis de las relaciones entre múltiples conjuntos de datos. Este método produce ponderaciones óptimas para una estructura común denominada "compromiso", que refleja la información compartida entre diferentes conjuntos de datos. Cada conjunto de datos se proyecta sobre esta estructura común para evaluar sus similitudes y diferencias.

Para asegurar un análisis equitativo, todos los datos se estandarizaron ajustando cada variable a una media de cero y estandarizando la varianza a uno. Este paso es crucial para minimizar el impacto de las diferentes escalas de medición en los análisis multivariantes.

Se utilizó el Escalamiento Total de Bouroche para la estandarización multivariante de los datos, lo cual es esencial para comparar datos sobre una base común. Las estructuras de datos y los resultados del STATIS se visualizaron mediante gráficos, facilitando así la interpretación de las interacciones complejas entre las variables y los tratamientos.

Estos métodos y técnicas estadísticas avanzadas proporcionan una base sólida para evaluar de manera rigurosa y sistemática la eficacia del biofertilizante en el desarrollo del cultivo de rábano, ofreciendo insights valiosos sobre la optimización de prácticas agrícolas sostenibles.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS

4.1. ANOVA

En el proceso de análisis de los datos obtenidos de la experimentación con rábanos, se identificó inicialmente la intención de utilizar el Análisis de Varianza (ANOVA) para evaluar diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos aplicados. ANOVA, conocido por su eficacia en comparar las medias de tres o más grupos, es ideal bajo el supuesto de que los datos están normalmente distribuidos y que las varianzas entre los grupos son homogéneas.

Sin embargo, tras una evaluación preliminar de los datos utilizando el test de Shapiro-Wilk para la normalidad y la prueba de Levene para la homogeneidad de varianzas, se encontró que estos supuestos no se cumplían. Los valores de p obtenidos de la prueba de Shapiro-Wilk (Tabla 4.1.) fueron consistentemente menores que el umbral de 0.05, indicando una significativa desviación de la normalidad. Además, la prueba de Levene (Tabla 4.2.) confirmó la presencia de heterogeneidad significativa en las varianzas entre los grupos para varias variables clave.

Dado que los supuestos fundamentales para la realización de ANOVA no se sostienen, se decidió optar por un enfoque estadístico alternativo que no requiera de la normalidad de los datos ni de la homogeneidad de varianzas. En este contexto, se eligió emplear métodos estadísticos no paramétricos, específicamente el test de Kruskal-Wallis. Esta prueba es adecuada para comparar medianas de tres o más grupos independientes sin asumir una distribución específica de los datos, lo que lo hace ideal para datos que no siguen una distribución normal y presentan varianzas desiguales entre grupos.

El test de Kruskal-Wallis se utilizará para determinar si existen diferencias estadísticas significativas en las variables de respuesta entre

los diferentes tratamientos aplicados a los rábanos. Este método ofrece una robustez considerable bajo condiciones donde ANOVA no sería aplicable, asegurando así la validez de los resultados obtenidos en el contexto de este estudio experimental.

Tabla 4.1. *Estadísticos Descriptivos*

Variable	Tratamiento	Válido	Ausente	Media	Desviación Típica	Shapiro- Wilk	Valor p Shapiro- Wilk	Mínimo	Máximo
AL14	TR-A	5	0	4.112	0.453	0.928	0.581	3.53	4.63
AL14	TR-B	5	0	3.2	0.105	0.891	0.362	3.05	3.3
AL14	TR-C	5	0	3.43	0.257	0.95	0.738	3.07	3.79
AL14	TR-D	5	0	4.41	0.295	0.969	0.869	4.01	4.83
AL14	TR-E	5	0	3.424	0.159	0.877	0.297	3.18	3.57
AL14	TR-F	5	0	3.332	0.311	0.897	0.393	3.01	3.7
AL14	TR-G	5	0	5.04	0.226	0.923	0.548	4.7	5.26
AL14	TR-H	5	0	5.792	0.073	0.972	0.891	5.71	5.9
AL14	TR-I	5	0	5.448	0.139	0.798	0.078	5.22	5.55
AL14	TR-J	5	0	6.186	0.15	0.906	0.442	6.01	6.35
AL14	TR-K	5	0	5.13	0.331	0.981	0.942	4.64	5.53
AL14	TR-L	5	0	5.282	0.182	0.97	0.876	5.05	5.52
AL21	TR-A	5	0	8.752	0.766	0.944	0.692	7.79	9.67
AL21	TR-B	5	0	7.818	1.303	0.933	0.619	5.84	9.1
AL21	TR-C	5	0	6.682	1.677	0.899	0.403	5.07	9.28
AL21	TR-D	5	0	10.67	0.627	0.952	0.749	9.98	11.53
AL21	TR-E	5	0	5.47	0.266	0.903	0.428	5.22	5.9
AL21	TR-F	5	0	5.174	0.087	0.971	0.882	5.06	5.3
AL21	TR-G	5	0	10.94	0.741	0.881	0.315	9.75	11.61
AL21	TR-H	5	0	12.71	0.388	0.977	0.916	12.25	13.29
AL21	TR-I	5	0	12.12	0.584	0.612	< .001	11.08	12.44
AL21	TR-J	5	0	13.21	0.258	0.864	0.242	12.8	13.42
AL21	TR-K	5	0	11.6	0.325	0.919	0.526	11.29	12.09
AL21	TR-L	5	0	10.93	0.436	0.892	0.365	10.22	11.39
AL32	TR-A	5	0	20.02	0.548	0.975	0.908	19.24	20.68
AL32	TR-B	5	0	13.56	1.431	0.961	0.812	11.75	15.28
AL32	TR-C	5	0	16.92	0.475	0.885	0.331	16.49	17.69
AL32	TR-D	5	0	24.61	1.07	0.862	0.235	23.74	26.25
AL32	TR-E	5	0	13.37	0.76	0.937	0.648	12.5	14.33
AL32	TR-F	5	0	17.31	0.147	0.862	0.235	17.11	17.44
AL32	TR-G	5	0	23.47	0.363	0.907	0.447	22.93	23.8
AL32	TR-H	5	0	26.35	0.151	0.906	0.443	26.19	26.55
AL32	TR-I	5	0	25.02	0.121	0.992	0.985	24.85	25.17
AL32	TR-J	5	0	26.49	0.251	0.909	0.464	26.13	26.73
AL32	TR-K	5	0	24.88	0.156	0.864	0.242	24.71	25.04

AL32	TR-L	5	0	25.7	0.308	0.742	0.025	25.16	25.91
DBULBO	TR-A	5	0	2.074	0.083	0.939	0.656	1.99	2.2
DBULBO	TR-B	5	0	1.66	0.193	0.868	0.257	1.48	1.92
DBULBO	TR-C	5	0	1.596	0.144	0.975	0.904	1.43	1.81
DBULBO	TR-D	5	0	3.502	0.14	0.819	0.114	3.37	3.74
DBULBO	TR-E	5	0	2.058	0.45	0.967	0.853	1.4	2.55
DBULBO	TR-F	5	0	2.438	0.024	0.974	0.899	2.41	2.47
DBULBO	TR-G	5	0	3.408	0.038	0.879	0.304	3.35	3.44
DBULBO	TR-H	5	0	4.554	0.091	0.928	0.581	4.41	4.66
DBULBO	TR-I	5	0	3.94	0.064	0.91	0.468	3.85	4
DBULBO	TR-J	5	0	4.778	0.027	0.852	0.201	4.75	4.81
DBULBO	TR-K	5	0	4.298	0.052	0.908	0.455	4.22	4.35
DBULBO	TR-L	5	0	4.426	0.021	0.739	0.023	4.39	4.44
PBULBO	TR-A	5	0	10.84	0.217	0.959	0.798	10.53	11.07
PBULBO	TR-B	5	0	3.77	1.032	0.942	0.679	2.6	5.25
PBULBO	TR-C	5	0	3.042	0.1	0.753	0.031	2.87	3.13
PBULBO	TR-D	5	0	29.59	1.483	0.939	0.662	27.25	31.14
PBULBO	TR-E	5	0	3.534	1.488	0.872	0.277	2	6
PBULBO	TR-F	5	0	8.226	0.974	0.876	0.29	7.4	9.8
PBULBO	TR-G	5	0	20.76	0.995	0.884	0.326	19.73	22.4
PBULBO	TR-H	5	0	42.08	1.653	0.893	0.373	40.53	44.6
PBULBO	TR-I	5	0	28.53	1.439	0.934	0.622	26.73	30.27
PBULBO	TR-J	5	0	46	1.911	0.917	0.51	42.93	48
PBULBO	TR-K	5	0	28.56	4.63	0.803	0.086	25.27	36.13
PBULBO	TR-L	5	0	29.29	0.751	0.942	0.683	28.13	30.13
PFOLLAJE	TR-A	5	0	0.253	0.014	0.914	0.491	0.236	0.267
PFOLLAJE	TR-B	5	0	0.086	0.052	0.842	0.169	0.026	0.136
PFOLLAJE	TR-C	5	0	0.164	0.01	0.816	0.108	0.148	0.172
PFOLLAJE	TR-D	5	0	0.408	0.123	0.781	0.057	0.27	0.52
PFOLLAJE	TR-E	5	0	0.049	0.024	0.962	0.825	0.017	0.084
PFOLLAJE	TR-F	5	0	0.215	0.008	0.974	0.898	0.205	0.225
PFOLLAJE	TR-G	5	0	0.454	0.012	0.987	0.967	0.438	0.47
PFOLLAJE	TR-H	5	0	0.731	0.021	0.968	0.861	0.7	0.756
PFOLLAJE	TR-I	5	0	0.547	0.031	0.952	0.75	0.5	0.58
PFOLLAJE	TR-J	5	0	0.813	0.058	0.965	0.844	0.732	0.892
PFOLLAJE	TR-K	5	0	0.538	0.092	0.782	0.057	0.472	0.696
PFOLLAJE	TR-L	5	0	0.525	0.029	0.919	0.523	0.478	0.553
NCLO	TR-A	5	0	1.572	0.277	0.868	0.257	1.22	1.834
NCLO	TR-B	5	0	1.415	0.284	0.938	0.653	0.993	1.789
NCLO	TR-C	5	0	1.469	0.294	0.987	0.969	1.047	1.849
NCLO	TR-D	5	0	1.414	0.385	0.872	0.273	0.99	1.847
NCLO	TR-E	5	0	1.678	0.149	0.848	0.188	1.552	1.885
NCLO	TR-F	5	0	1.379	0.217	0.933	0.619	1.088	1.616
NCLO	TR-G	5	0	1.585	0.356	0.795	0.074	0.973	1.855
NCLO	TR-H	5	0	1.326	0.212	0.866	0.252	1.153	1.663

NCLO	TR-I	5	0	1.231	0.131	0.768	0.044	1.084	1.34
NCLO	TR-J	5	0	1.319	0.269	0.87	0.268	1.08	1.756
NCLO	TR-K	5	0	1.32	0.293	0.945	0.699	0.993	1.701
NCLO	TR-L	5	0	1.393	0.318	0.903	0.425	1.07	1.791
NH	TR-A	5	0	5.2	1.304	0.735	0.021	3	6
NH	TR-B	5	0	3.8	0.447	0.552	< .001	3	4
NH	TR-C	5	0	2.6	1.949	0.753	0.032	0	4
NH	TR-D	5	0	4.4	2.074	0.842	0.171	1	6
NH	TR-E	5	0	5	0	NaN	NaN	5	5
NH	TR-F	5	0	5.2	0.447	0.552	< .001	5	6
NH	TR-G	5	0	5.6	0.548	0.684	0.006	5	6
NH	TR-H	5	0	6.6	0.548	0.684	0.006	6	7
NH	TR-I	5	0	6.6	0.548	0.684	0.006	6	7
NH	TR-J	5	0	6.4	0.548	0.684	0.006	6	7
NH	TR-K	5	0	7.8	0.837	0.881	0.314	7	9
NH	TR-L	5	0	7.6	0.894	0.771	0.046	7	9
AFOLI	TR-A	5	0	1.366	0.324	0.963	0.83	0.975	1.774
AFOLI	TR-B	5	0	1.604	0.22	0.714	0.013	1.358	1.772
AFOLI	TR-C	5	0	1.441	0.34	0.83	0.14	0.871	1.707
AFOLI	TR-D	5	0	1.242	0.21	0.969	0.869	0.993	1.55
AFOLI	TR-E	5	0	1.363	0.317	0.955	0.774	0.984	1.745
AFOLI	TR-F	5	0	1.619	0.391	0.849	0.191	1.064	1.963
AFOLI	TR-G	5	0	1.337	0.254	0.881	0.313	1.015	1.599
AFOLI	TR-H	5	0	1.323	0.305	0.952	0.752	0.974	1.738
AFOLI	TR-I	5	0	1.505	0.26	0.889	0.353	1.239	1.929
AFOLI	TR-J	5	0	1.53	0.361	0.923	0.553	1.033	1.885
AFOLI	TR-K	5	0	1.528	0.44	0.878	0.302	0.937	1.922
AFOLI	TR-L	5	0	1.455	0.328	0.974	0.899	1.028	1.929
PSECO	TR-A	5	0	0.108	0.045	0.86	0.228	0.05	0.15
PSECO	TR-B	5	0	0.128	0.048	0.892	0.368	0.06	0.17
PSECO	TR-C	5	0	0.058	0.055	0.852	0.202	0	0.12
PSECO	TR-D	5	0	0.102	0.08	0.975	0.909	0	0.21
PSECO	TR-E	5	0	0.104	0.045	0.795	0.074	0.07	0.18
PSECO	TR-F	5	0	0.108	0.054	0.82	0.117	0.06	0.2
PSECO	TR-G	5	0	0.166	0.138	0.7	0.01	0.08	0.41
PSECO	TR-H	5	0	0.404	0.128	0.935	0.628	0.22	0.53
PSECO	TR-I	5	0	0.41	0.05	0.951	0.742	0.34	0.47
PSECO	TR-J	5	0	0.458	0.084	0.714	0.013	0.31	0.51
PSECO	TR-K	5	0	0.31	0.154	0.904	0.43	0.11	0.47
PSECO	TR-L	5	0	0.686	0.14	0.965	0.844	0.52	0.86
LRAIZ	TR-A	5	0	2.8	1.007	0.92	0.532	1.5	3.9
LRAIZ	TR-B	5	0	2.6	0.735	0.973	0.896	1.5	3.5
LRAIZ	TR-C	5	0	1.74	1.599	0.758	0.035	0	3.1
LRAIZ	TR-D	5	0	3.62	2.974	0.982	0.947	0	8
LRAIZ	TR-E	5	0	4.14	0.669	0.968	0.862	3.2	5

LRAIZ	TR-F	5	0	4.3	0.628	0.933	0.617	3.5	5
LRAIZ	TR-G	5	0	5.56	1.479	0.815	0.106	3.3	6.7
LRAIZ	TR-H	5	0	6.64	1.457	0.878	0.301	5	9
LRAIZ	TR-I	5	0	7.32	1.942	0.966	0.851	4.5	9.7
LRAIZ	TR-J	5	0	7.24	1.613	0.937	0.643	5.5	9.4
LRAIZ	TR-K	5	0	6.9	2.036	0.968	0.86	4.5	9.8
LRAIZ	TR-L	5	0	8.32	1.855	0.778	0.053	6.1	9.9
DTALLO	TR-A	5	0	0.925	0.291	0.868	0.257	0.555	1.201
DTALLO	TR-B	5	0	0.76	0.299	0.938	0.653	0.315	1.153
DTALLO	TR-C	5	0	0.817	0.31	0.987	0.969	0.372	1.217
DTALLO	TR-D	5	0	0.759	0.405	0.872	0.273	0.312	1.215
DTALLO	TR-E	5	0	1.037	0.157	0.848	0.188	0.904	1.254
DTALLO	TR-F	5	0	0.722	0.229	0.933	0.619	0.416	0.971
DTALLO	TR-G	5	0	0.938	0.374	0.795	0.074	0.294	1.223
DTALLO	TR-H	5	0	0.666	0.223	0.866	0.252	0.484	1.021
DTALLO	TR-I	5	0	0.565	0.138	0.768	0.044	0.411	0.68
DTALLO	TR-J	5	0	0.658	0.283	0.87	0.268	0.407	1.119
DTALLO	TR-K	5	0	0.66	0.309	0.945	0.699	0.315	1.061
DTALLO	TR-L	5	0	0.737	0.335	0.903	0.425	0.396	1.156
PSUPER	TR-A	5	0	1	0	NaN	NaN	1	1
PSUPER	TR-B	5	0	0.587	0.208	0.885	0.332	0.333	0.8
PSUPER	TR-C	5	0	1	0	NaN	NaN	1	1
PSUPER	TR-D	5	0	0.933	0.094	0.767	0.042	0.8	1
PSUPER	TR-E	5	0	0.627	0.252	0.903	0.429	0.4	1
PSUPER	TR-F	5	0	1	0	NaN	NaN	1	1
PSUPER	TR-G	5	0	1	0	NaN	NaN	1	1
PSUPER	TR-H	5	0	1	0	NaN	NaN	1	1
PSUPER	TR-I	5	0	0.973	0.06	0.552	< .001	0.867	1
PSUPER	TR-J	5	0	1	0	NaN	NaN	1	1
PSUPER	TR-K	5	0	1	0	NaN	NaN	1	1
PSUPER	TR-L	5	0	1	0	NaN	NaN	1	1

Nota: PSUPER porcentaje de supervivencia, AL14: altura a los 14 días, AL21: altura a los 21 días, AL32: altura a los 32 días, DBULBO: diámetro del bulbo, PBULBO: peso del bulbo, PFOLLAJE: peso de follaje, NCLO: nivel de clorofila, NH: Número de hojas, AFOLI: área foliar, PSECO: peso seco, LRAIZ: longitud de la raíz y DTALLO: diámetro del tallo.

Tabla 4.2. Verificaciones de Supuestos

Contraste de Igualdad de Varianzas (de Levene)

Variable	F	gl1	gl2	p	Valor p Shapiro-Wilk
PSUPER	12.708	11.000	48.000	< .001	< 0.00
AL14	2.182	11.000	48.000	0.031	< 0.00
AL21	2.840	11.000	48.000	0.006	< 0.00
AL32	6.649	11.000	48.000	< .001	< 0.00
DBULBO	6.597	11.000	48.000	< .001	< 0.00
PBULBO	4.242	11.000	48.000	< .001	< 0.00

Contraste de Igualdad de Varianzas (de Levene)

Variable	F	gl1	gl2	p	Valor p Shapiro-Wilk
PFOLLAJE	7.560	11.000	48.000	< .001	< 0.01
NCLO	0.966	11.000	48.000	0.489	< 0.01
NH	5.266	11.000	48.000	< .001	< 0.00
AFOLI	0.794	11.000	48.000	0.645	0.04
PSECO	2.308	11.000	48.000	0.023	< 0.00
LRAIZ	1.799	11.000	48.000	0.080	< 0.17
DTALLO	0.966	11.000	48.000	0.489	< 0.01

4.2. Contraste de Kruskal-Wallis

El test de Kruskal-Wallis se aplicó para comparar las medianas de las respuestas de diferentes tratamientos del biofertilizante en múltiples variables de interés relacionadas con el crecimiento y desarrollo de los rábanos. Los resultados obtenidos están detallados en la Tabla 4.3., donde se observa que todas las variables expuestas en la tabla mostraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, con p-valores muy por debajo del umbral de 0.05. Esto indica que, al menos para algunas de las medias de estas variables, existen diferencias significativas que pueden atribuirse al efecto de los tratamientos.

Estos hallazgos sugieren que, a pesar de las restricciones impuestas por la naturaleza de los datos, es posible detectar y cuantificar efectos significativos de los tratamientos utilizando métodos estadísticos adecuados para los datos disponibles. Este enfoque robusto permite cumplir con el objetivo inicial del estudio de evaluar la eficacia de diferentes tratamientos de biofertilizante en el crecimiento y salud de las plantas, aunque a través de un método estadístico alternativo al ANOVA originalmente planificado.

Tabla 4.3. *Contraste de Kruskal-Wallis*

Factor	Estadístico	gl	p
PSUPER - TRATAMIENTOS	44.307	11	< .001
AL14 - TRATAMIENTOS	55.186	11	< .001
AL21 - TRATAMIENTOS	55.296	11	< .001
AL32 - TRATAMIENTOS	56.605	11	< .001

Factor	Estadístico	gl	p
DBULBO - TRATAMIENTOS	57.099	11	< .001
PBULBO - TRATAMIENTOS	56.024	11	< .001
PFOLLAJE - TRATAMIENTOS	56.760	11	< .001
NH – TRATAMIENTOS	48.650	11	< .001
PSECO – TRATAMIENTOS	44.053	11	< .001
LRAIZ - TRATAMIENTOS	42.413	11	< .001
NCLO - TRATAMIENTOS	11.399	11	0.410
AFOLI - TRATAMIENTOS	8.184	11	0.697
DTALLO- TRATAMIENTOS	11.399	11	0.410

Los resultados del test de Wilcoxon, Tabla 4.4., revelan diferencias significativas entre las variables medidas, complementando el análisis global realizado con Kruskal-Wallis. En casi todas las comparaciones por pares, se observan valores p inferiores a 0.001, lo que indica diferencias estadísticamente significativas entre las medianas de las variables bajo los diferentes tratamientos. Por ejemplo, las comparaciones entre PSUPER y variables como AL14, AL21, AL32, y DBULBO, muestran diferencias claras, evidenciadas por los valores de z negativos y los p-valores extremadamente bajos. Esto sugiere que las respuestas de las plantas a los tratamientos varían considerablemente dependiendo de la variable considerada. Además, las pocas comparaciones que no muestran diferencias significativas, como la de AL32 con PBULBO, destacan que algunas variables tienen respuestas similares bajo los tratamientos aplicados. Estos hallazgos subrayan la importancia de realizar un análisis detallado para identificar específicamente entre cuáles variables y tratamientos existen diferencias, proporcionando así una visión más completa y precisa del impacto de los tratamientos.

Los tratamientos **TR-K** y **TR-L** destacan en varias comparaciones por mostrar consistentemente valores altos en varias variables, lo que sugiere que estos tratamientos podrían estar asociados con respuestas más positivas. Estos tratamientos muestran diferencias significativas con otros, particularmente en el contexto de variables como **Largo de raíz** y **Peso seco**, lo que sugiere que tienen un impacto considerable en el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Tabla 4.4. Contraste Wilcoxon para Muestras Emparejadas

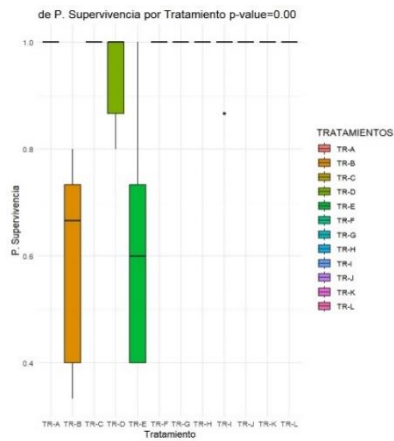
Medida 1	Medida 2	Estadístico	z	p
PSUPER	- AL14	0	-6.736	< .001
PSUPER	- AL21	0	-6.736	< .001
PSUPER	- AL32	0	-6.736	< .001
PSUPER	- DBULBO	0	-6.736	< .001
PSUPER	- PBULBO	0	-6.736	< .001
PSUPER	- PFOLLAJE	1830	6.736	< .001
PSUPER	- NCLO	6	-6.692	< .001
PSUPER	- NH	2	-6.665	< .001
PSUPER	- AFOLI	26	-6.544	< .001
PSUPER	- PSECO	1830	6.736	< .001
PSUPER	- LRAIZ	10	-6.662	< .001
PSUPER	- DTALLO	1334	3.085	0.002
AL14	- AL21	0	-6.736	< .001
AL14	- AL32	0	-6.736	< .001
AL14	- DBULBO	1830	6.736	< .001
AL14	- PBULBO	58	-6.242	< .001
AL14	- PFOLLAJE	1830	6.736	< .001
AL14	- NCLO	1830	6.736	< .001
AL14	- NH	236	-4.999	< .001
AL14	- AFOLI	1830	6.736	< .001
AL14	- PSECO	1830	6.736	< .001
AL14	- LRAIZ	650	-1.951	0.052
AL14	- DTALLO	1830	6.736	< .001
AL21	- AL32	0	-6.736	< .001
AL21	- DBULBO	1830	6.736	< .001
AL21	- PBULBO	217	-5.138	< .001
AL21	- PFOLLAJE	1830	6.736	< .001
AL21	- NCLO	1830	6.736	< .001
AL21	- NH	1820	6.662	< .001
AL21	- PSECO	1830	6.736	< .001
AL21	- LRAIZ	1830	6.736	< .001
AL21	- DTALLO	1830	6.736	< .001
AL32	- DBULBO	1830	6.736	< .001
AL32	- PBULBO	977	0.456	0.651
AL32	- PFOLLAJE	1830	6.736	< .001
AL32	- NCLO	1830	6.736	< .001
AL32	- NH	1830	6.736	< .001
AL32	- AFOLI	1830	6.736	< .001
AL32	- PSECO	1830	6.736	< .001
AL32	- LRAIZ	1830	6.736	< .001
AL32	- DTALLO	1830	6.736	< .001

DBULBO	- PBULBO	0	-6.736	< .001
DBULBO	- PFOLLAJE	1830	6.736	< .001
DBULBO	- NCLO	1802	6.53	< .001
DBULBO	- NH	58	-6.309	< .001
DBULBO	- AFOLI	1801	6.522	< .001
DBULBO	- PSECO	1830	6.736	< .001
DBULBO	- LRAIZ	145	-5.668	< .001
DBULBO	- DTALLO	1830	6.736	< .001
PBULBO	- PFOLLAJE	1830	6.736	< .001
PBULBO	- NCLO	1830	6.736	< .001
PBULBO	- NH	1703	6.174	< .001
PBULBO	- AFOLI	1830	6.736	< .001
PBULBO	- PSECO	1830	6.736	< .001
PBULBO	- LRAIZ	1788.5	6.43	< .001
PBULBO	- DTALLO	1830	6.736	< .001
PFOLLAJE	- NCLO	0	-6.736	< .001
PFOLLAJE	- NH	1	-6.729	< .001
PFOLLAJE	- AFOLI	0	-6.736	< .001
PFOLLAJE	- PSECO	1587.5	4.951	< .001
PFOLLAJE	- LRAIZ	6	-6.692	< .001
PFOLLAJE	- DTALLO	244	-4.94	< .001
NCLO	- NH	6	-6.692	< .001
NCLO	- AFOLI	845	-0.515	0.609
NCLO	- PSECO	1830	6.736	< .001
NCLO	- LRAIZ	36	-6.471	< .001
NCLO	- DTALLO	1830	6.736	< .001
NH	- AFOLI	1824	6.692	< .001
NH	- PSECO	1770	6.68	< .001
NH	- LRAIZ	1186.5	2.563	0.01
NH	- DTALLO	1826	6.706	< .001
AFOLI	- PSECO	1830	6.736	< .001
AFOLI	- LRAIZ	32	-6.5	< .001
AFOLI	- DTALLO	1785	6.405	< .001
PSECO	- LRAIZ	0	-6.567	< .001
PSECO	- DTALLO	64	-6.265	< .001
LRAIZ	- DTALLO	1818	6.648	< .001

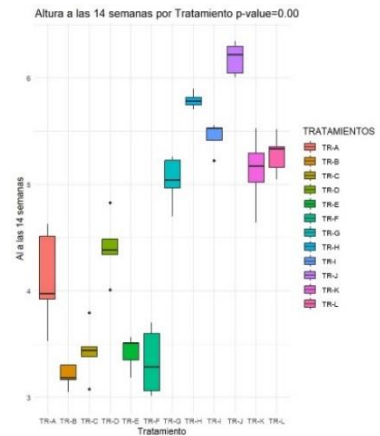
En los siguientes gráficos de boxplot (Figura 4.1) se visualizan las diferencias en las variables respuesta según los tratamientos aplicados. Para Porcentaje de Supervivencia, Largo de raíz, Peso seco, Número de hojas, Peso de follaje, Peso del bulbo, Diámetro del bulbo y Altura a los 32 días, los valores p de Kruskal-Wallis son 0.00, indicando diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. Estos gráficos

muestran cómo algunos tratamientos destacan con valores más altos o bajos en comparación con otros, lo que refuerza los resultados obtenidos en los análisis estadísticos anteriores.

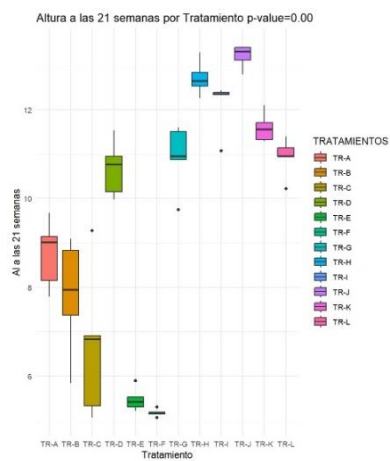
Figura 4.1. Comparación de Tratamientos mediante Boxplots para Variables



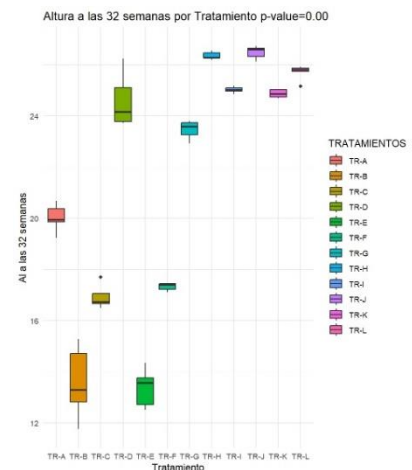
a)



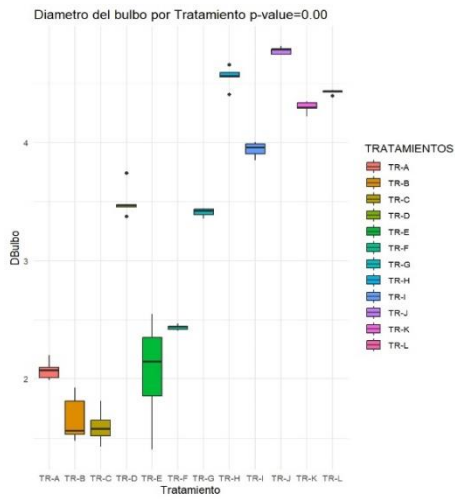
b)



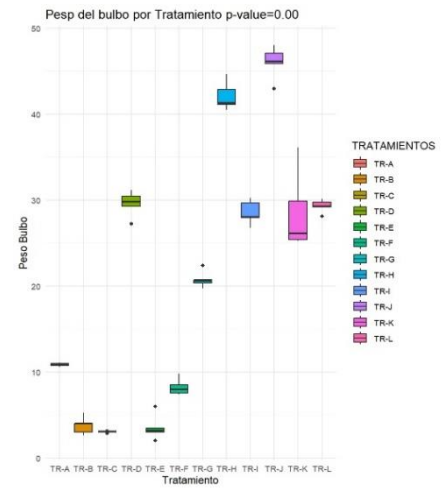
c)



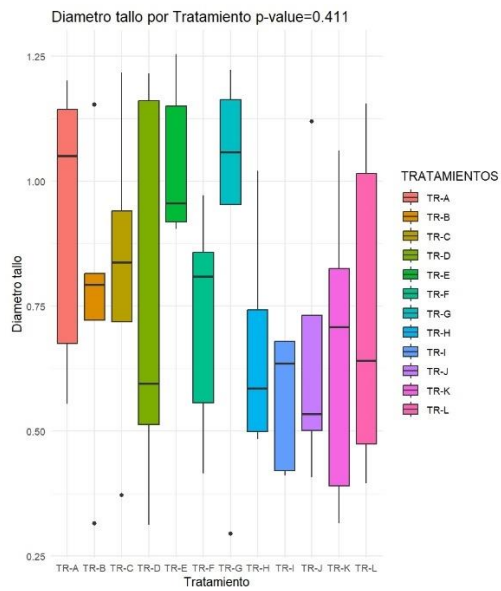
d)



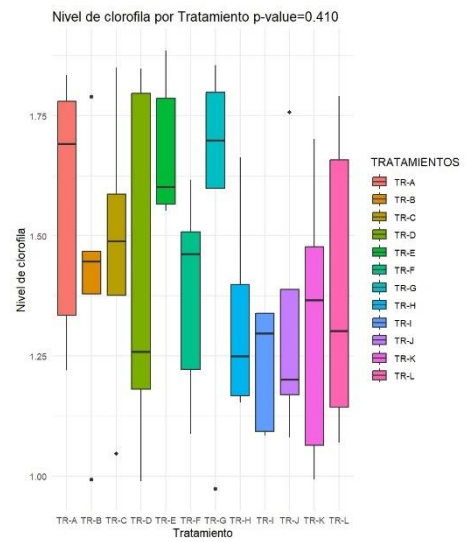
e)



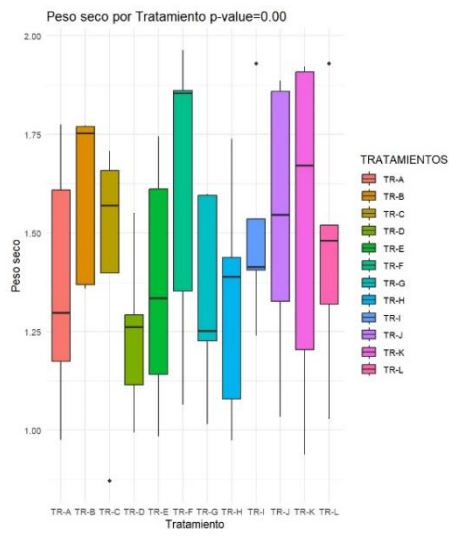
f)



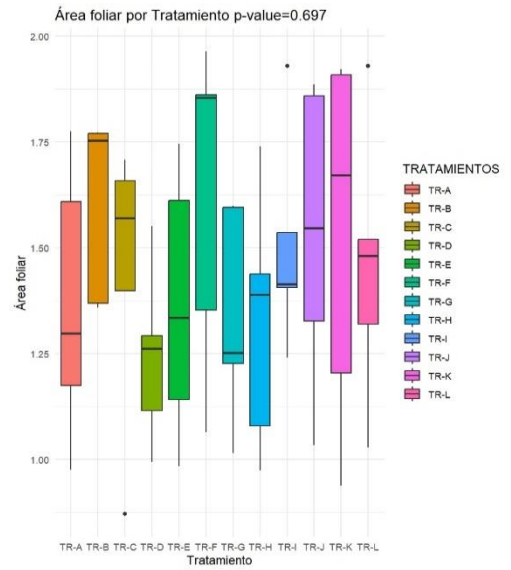
g)



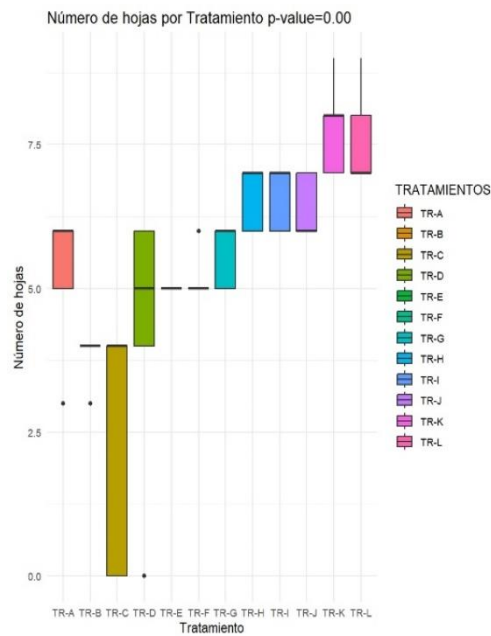
h)



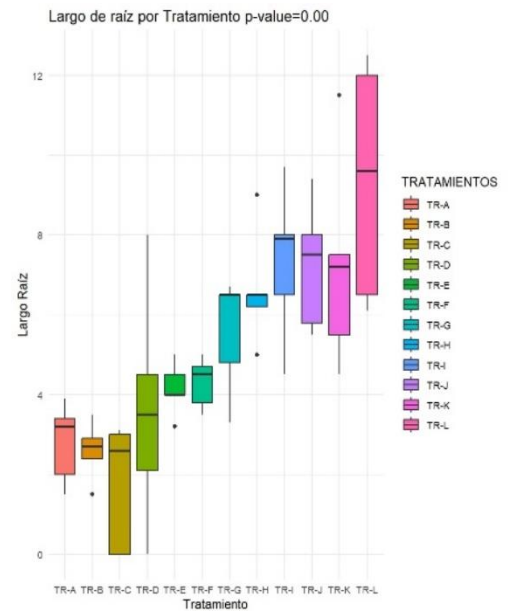
i)



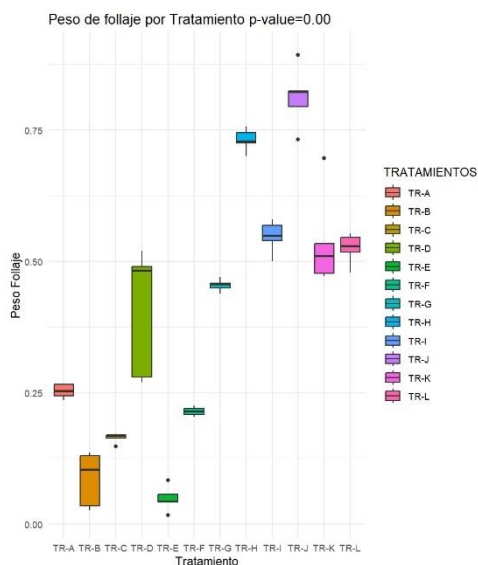
j)



k)



l)



m)

4.3. STATIS

4.3.1. Interstructure (Interestructura)

El gráfico de interestructura, Figura 4.2. a), ayuda a visualizar cómo cada combinación de variedad y tratamiento contribuyen a la estructura de los datos en el espacio multivariante. Identifica si las respuestas al tratamiento son más influenciadas por la variedad de rábano o por el tipo de tratamiento, y para detectar cualquier patrón de agrupamiento o dispersión entre las diferentes condiciones experimentales. Esto es crucial para entender la dinámica entre las variables y cómo optimizar el uso de biofertilizantes y aditivos en diferentes variedades de rábano.

Vemos que TR-G y TR-H (ambos con "Scarlet Champion" pero con diferentes aditivos al biofertilizante) están alejados en el gráfico, esto indica que *Trichoderma sp* y *Paenibacillus polymyxa* tienen efectos distintos en esta variedad.

En la Figura 4.2. b) observamos los valores del índice de Correlación Vectorial (RV) que permite identificar las relaciones entre las tablas de datos y a su vez, ayuda a analizar la interestructura, que es fundamental para entender las similitudes entre las tablas. Aquí se utilizan correlaciones para representar las similitudes o diferencias entre las k-tablas basadas en sus patrones de datos. Los colores en la matriz indican la intensidad de la correlación, con verde para correlaciones

positivas y rojo para negativas, mostrando cuán similares o diferentes son las tablas en términos de sus variables observadas.

El dendrograma asociado facilita la visualización de las relaciones entre las tablas, agrupando aquellas con características similares. Esto permite interpretar de manera visual y clara qué tablas comparten una estructura similar y cuáles se diferencian estructuralmente bajo el análisis. Este enfoque es especialmente valioso para identificar patrones o clústers dentro de grandes conjuntos de datos multivariantes

Estos tratamientos probablemente representan conjuntos de datos o condiciones experimentales que se comportan de manera similar bajo las variables observadas en el estudio. Estos hallazgos pueden ser útiles para determinar qué tratamientos pueden ser combinados o comparados en análisis posteriores debido a sus similitudes.

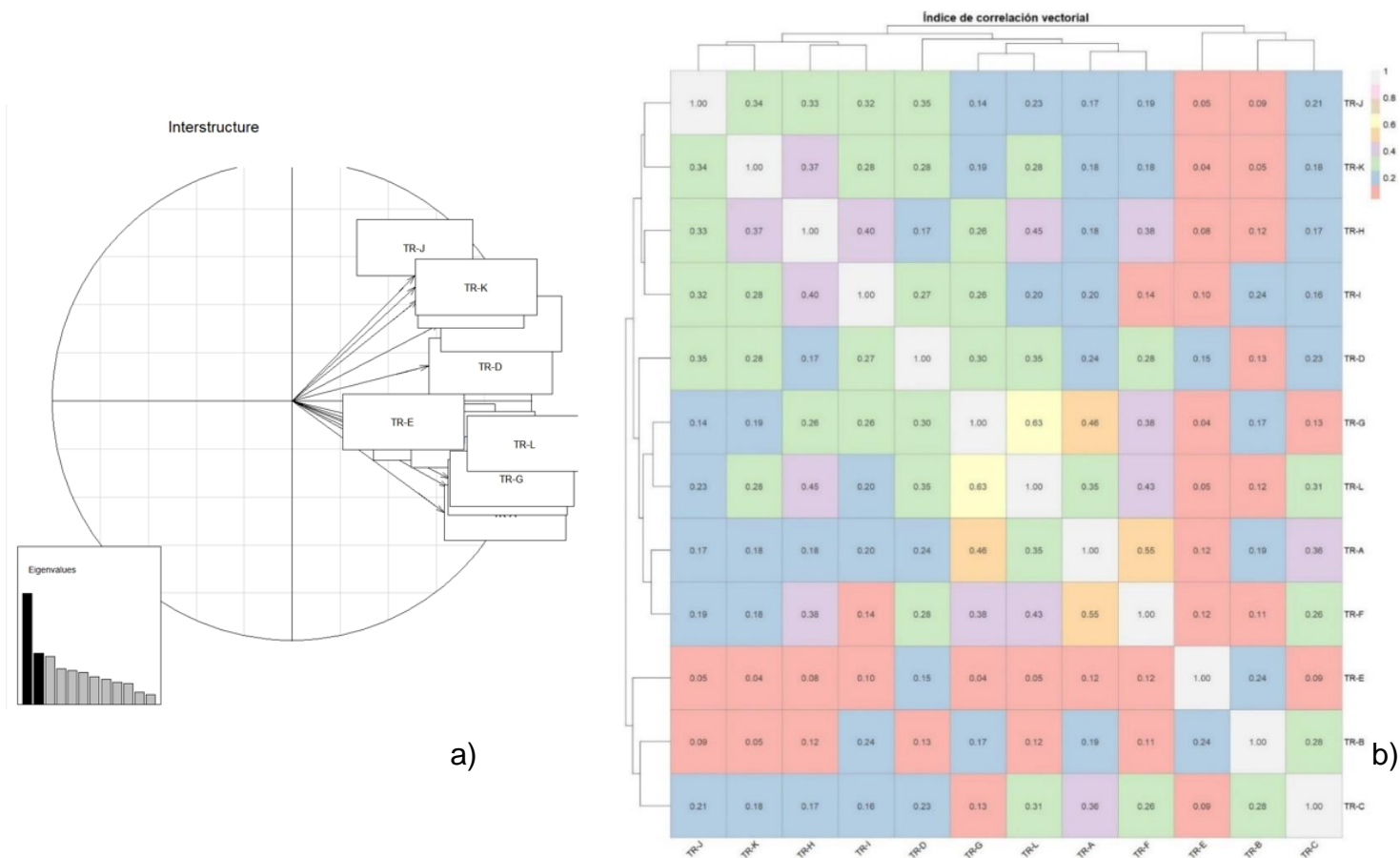
Visualizamos que los tratamientos TR-G y TR-L tienen la correlación más alta (0.63), lo que indica que comparten características muy similares en el análisis.

Otros pares de tratamientos como TR-A y TR-F también muestran correlaciones muy altas (0.55), sugiriendo que estos pares de tratamientos poseen características similares.

También podemos observar en la Figura 4.2. b) la estructura del dendrograma en donde se forman 3 grupos:

- El primer grupo incluye los tratamientos TR-J, TR-K, TR-H y TR-I, que representan el impacto del uso de biofertilizante en las tres variedades de rábano en combinación con la cinética del *Trichoderma sp.*
- El segundo grupo, compuesto por TR-D, TR-G, TR-L, TR-A y TR-F, refleja los efectos en las variedades *Scarlet Champion* y *Reggae Rábano*, observando la interacción entre la cinética de *Trichoderma sp.* y *Paenibacillus polymyxa*.
- El tercer clúster, que agrupa a TR-E, TR-B y TR-C, muestra las variedades *Crimson Giant* y *Reggae Rábano* bajo condiciones de control y el efecto de un 10% de biofertilizante sobre la variedad *Crimson Giant*.

Figura 4.2. Interestructura e Índice de Correlación Vectorial



4.3.2. Compromise (Compromiso)

Los dos ejes principales en la Figura 4.3 representan las dos primeras dimensiones (Componente Principal 1 y Componente Principal 2, Figura 4.3), que capturan la mayor variabilidad en el conjunto de datos. En la interestructura, estos dos componentes principales explican un 71.83% de la varianza total, el primer componente explica el 60.10% de la varianza, mientras que el segundo explica el 11.73%, lo que indica que una parte significativa de la variabilidad observada puede ser representada por estos dos ejes. Cada eje revela diferentes patrones de relación entre las variables, destacando su importancia en la modelación y análisis de las estructuras subyacentes en el conjunto de datos. Las variables como PSECO, NH y LRAIZ apuntan hacia la parte superior derecha, lo que sugiere que están fuertemente correlacionadas entre sí,

siendo además PSECO una de las variables que presentaron mayor variabilidad. PFOLLAJE es una de las variables que más contribuye en explicar la variabilidad capturada por el Componente Principal 1. Variables como DBULBO y PBULBO cuyos vectores apuntan en una dirección opuesta indica que contribuyen a otra dimensión de la variabilidad, capturada por el Componente Principal 2.

La cercanía y el ángulo entre las flechas de las variables indican el grado de correlación. Por ejemplo, PSECO y NH están muy alineadas y apuntan en la misma dirección, lo que indica una alta correlación positiva. Las demás variables que apuntan en direcciones casi opuestas, como DBULBO y algunas otras variables de crecimiento, pueden indicar correlaciones negativas o diferentes patrones de relación. La longitud de las flechas es proporcional a la importancia de las variables en el plano. En la Figura 4.4. observamos la componente principal 1 que absorbe la mayor variabilidad del análisis junto al componente principal 2 este grafico de barras lo que nos expresa es que las que se extienden hacia arriba, como las de PSECO, PFOLLAJE y AL_14, indican una fuerte influencia positiva en este componente. Estas variables pueden estar asociadas con aspectos de crecimiento físico y acumulación de biomasa, siendo críticos en la evaluación de la efectividad del tratamiento en términos de desarrollo y crecimiento. Las barras que se extienden hacia abajo, como NCLO y DTALLO, muestran una influencia negativa en el componente, lo que sugiere que estos aspectos (nivel de clorofila y diámetro del tallo) varían de manera opuesta en comparación con el peso seco y el peso follaje en el contexto del análisis.

El segundo gráfico de barras ilustra las contribuciones al segundo componente principal (CP2). PBULBO muestran contribuciones importantes, lo que indica que este componente podría estar capturando variaciones relacionadas con la estructura y características fisiológicas específicas del peso del bulbo y la eficiencia fotosintética (clorofila), respectivamente. A diferencia del CP1, en CP2 la relación entre las variables muestra un patrón diferente, destacando cómo diferentes factores como la eficiencia de la clorofila y el peso del bulbo contribuyen

conjuntamente a otra forma de variabilidad observada en respuesta a los tratamientos.

Figura 4.3. Compromiso

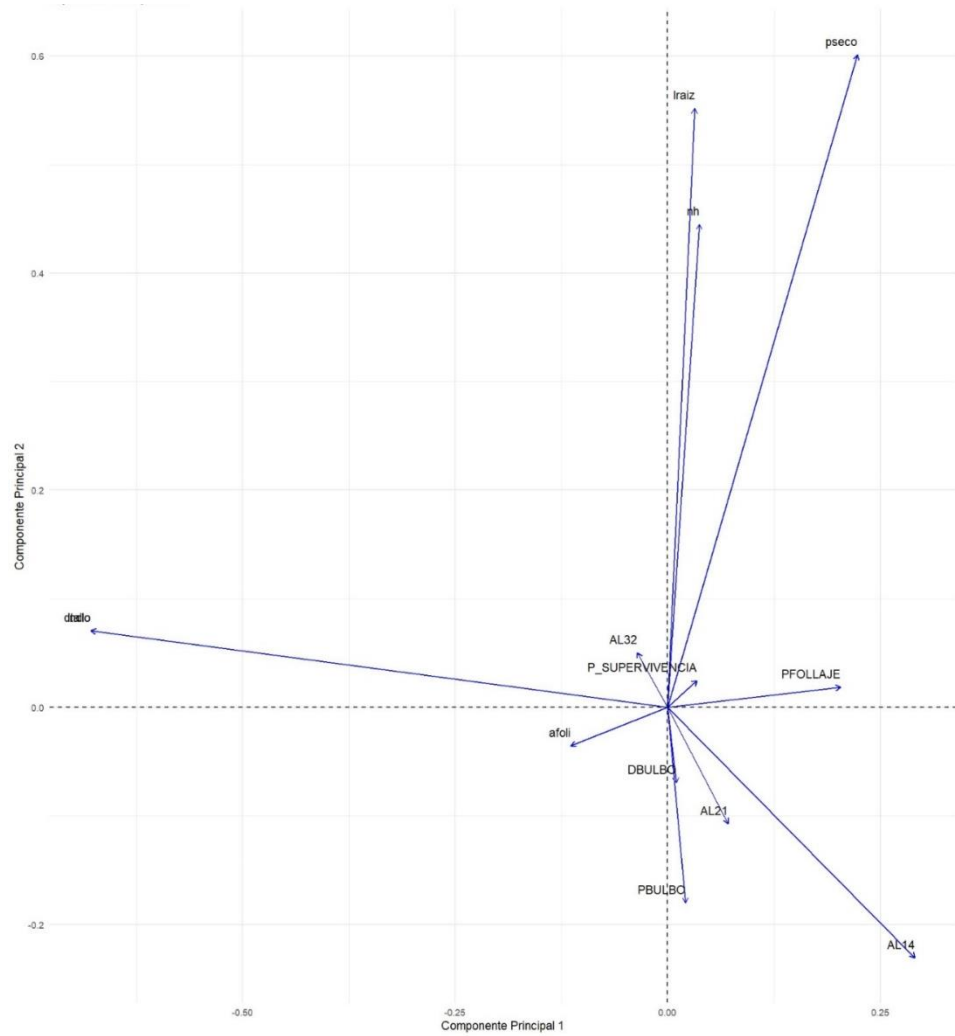
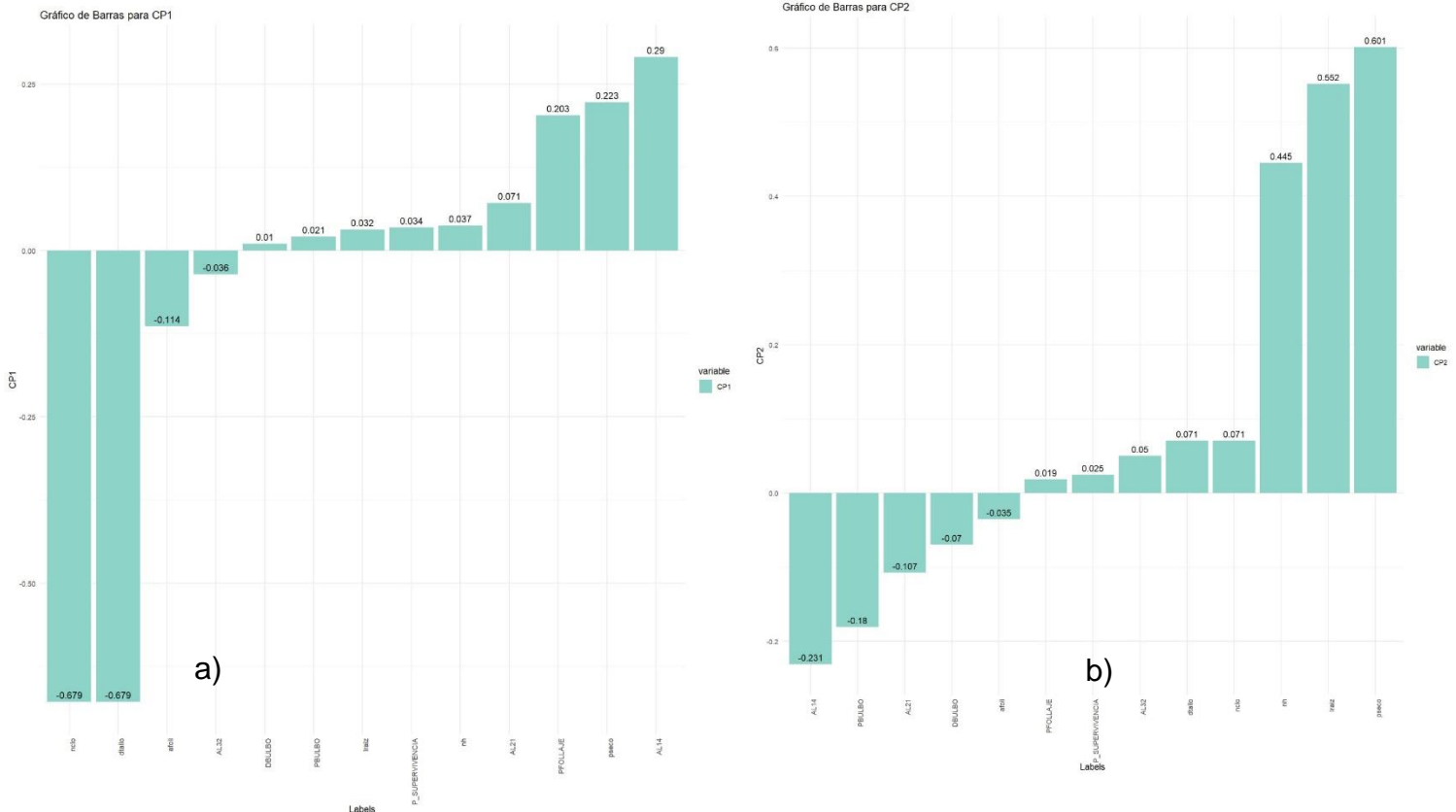


Figura 4.4. Componentes Principales 1 y 2.



Nota: El literal a) corresponde al primer componente principal (CP1) y b) al segundo componente principal (CP2).

Al evaluar los métodos estadísticos ANOVA y STATIS dentro de un diseño experimental, es crucial considerar tanto sus diferencias fundamentales como sus aplicaciones específicas. ANOVA es comúnmente usado para detectar diferencias significativas entre las medias de varios grupos, bajo la suposición de que los datos siguen una distribución normal y que las varianzas entre grupos son iguales. Este método es ideal para experimentos diseñados para probar el impacto de distintos tratamientos o condiciones sobre una variable cuantitativa.

No obstante, si los datos no satisfacen las condiciones de normalidad y homogeneidad de las varianzas, como indicaron las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene en nuestros resultados, ANOVA podría no ser adecuado. En estas situaciones particulares usamos pruebas no paramétricas como el test de Kruskal-Wallis, que no dependen de la distribución normal de los datos.

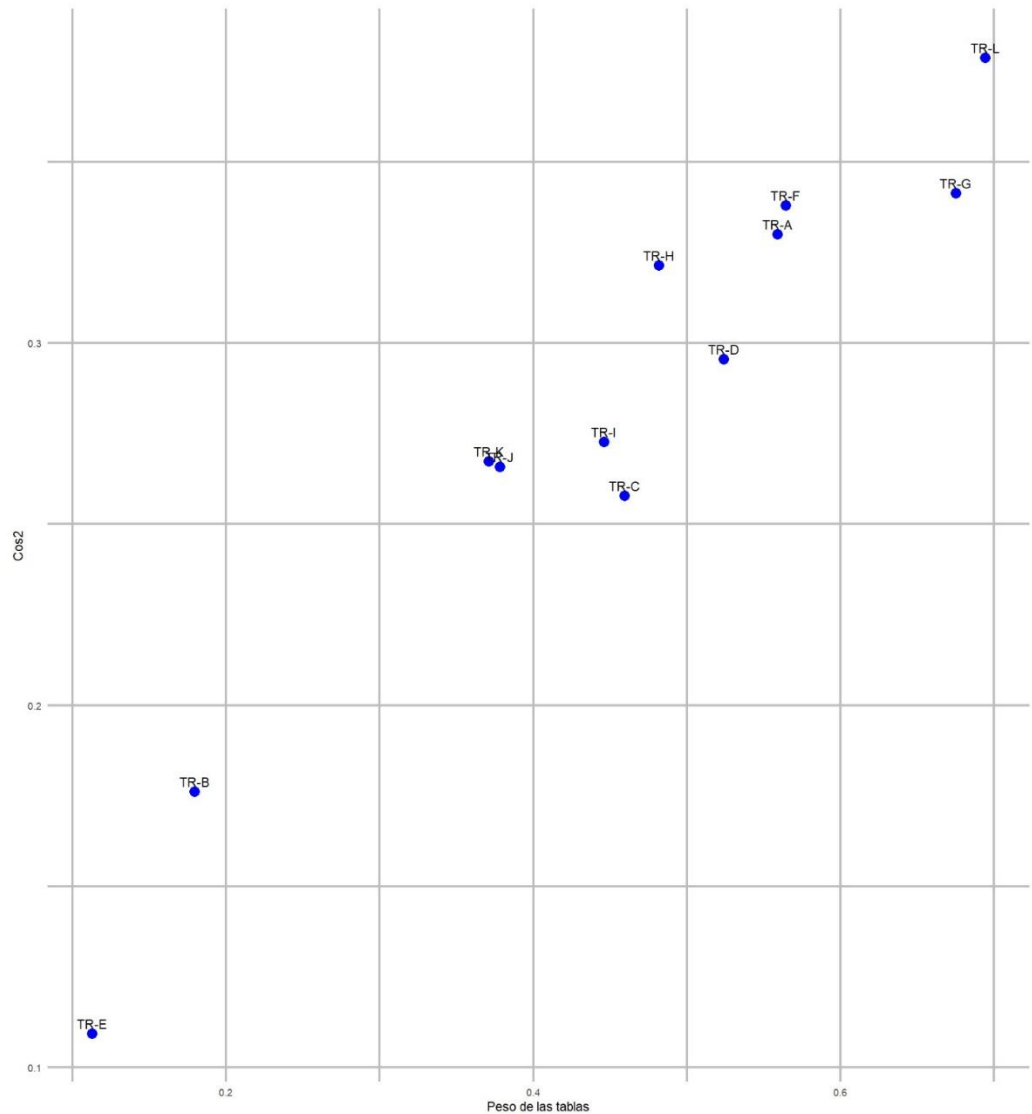
En contraste, STATIS adopta un enfoque multivariable que es beneficioso para analizar conjuntos de datos múltiples al identificar patrones comunes entre ellos. Esto nos fue muy útil para manejar datos complejos y explorar las relaciones entre diversas variables simultáneamente, lo que permite una interpretación más profunda que podría ser difícil de percibir con métodos univariantes como ANOVA. En nuestro estudio sobre la eficacia de diferentes biofertilizantes en plantas, STATIS te ofrece una manera integral de comparar cómo diversos tratamientos influyen en varias variables de respuesta. Esto proporciona una comprensión amplia de las interacciones subyacentes que pueden afectar el crecimiento y desarrollo de las plantas.

En la Figura 4.5, se muestra la relación entre el peso de las tablas (tratamientos) y sus valores de \cos^2 . Esta representación indica qué tan bien está representado cada tratamiento en el compromiso global del análisis STATIS. Los tratamientos con mayor \cos^2 están mejor representados en el compromiso, mientras que aquellos con menor \cos^2 aportan menos información a la estructura común.

TR-L destaca al estar bastante separado de los otros tratamientos, lo que sugiere que su estructura de datos es muy distinta. En cambio, TR-K, TR-J y TR-C están muy próximos entre sí, indicando que son similares en términos de las variables estudiadas. Tratamientos como TR-L y TR-G son los que aportaron más información para construir el compromiso, y a su vez tienen el valor de \cos^2 más alto, lo que significa que están mejor representados en el compromiso.

Por otro lado, TR-E contribuye con poca información para construir el compromiso y está menos representado, ya que tiene un valor de \cos^2 bajo.

Figura 4.5. Relación entre el Peso de las Tablas y Cos^2 de los Tratamientos



4.3.3. Intraestructura

La intraestructura desglosa las relaciones internas dentro de cada tratamiento, mostrando cómo las variables se relacionan y contribuyen a la estructura general del tratamiento. Este análisis es útil para entender por qué ciertos tratamientos se comportan de manera similar o diferente a otros en estudios comparativos, como los que emplean pruebas como el test de Wilcoxon. Al observar los patrones en este gráfico, podemos identificar qué variables tienen el mayor impacto dentro de cada

tratamiento, y cómo estas relaciones internas podrían estar influyendo en los resultados globales del análisis STATIS y en las comparaciones entre tratamientos.

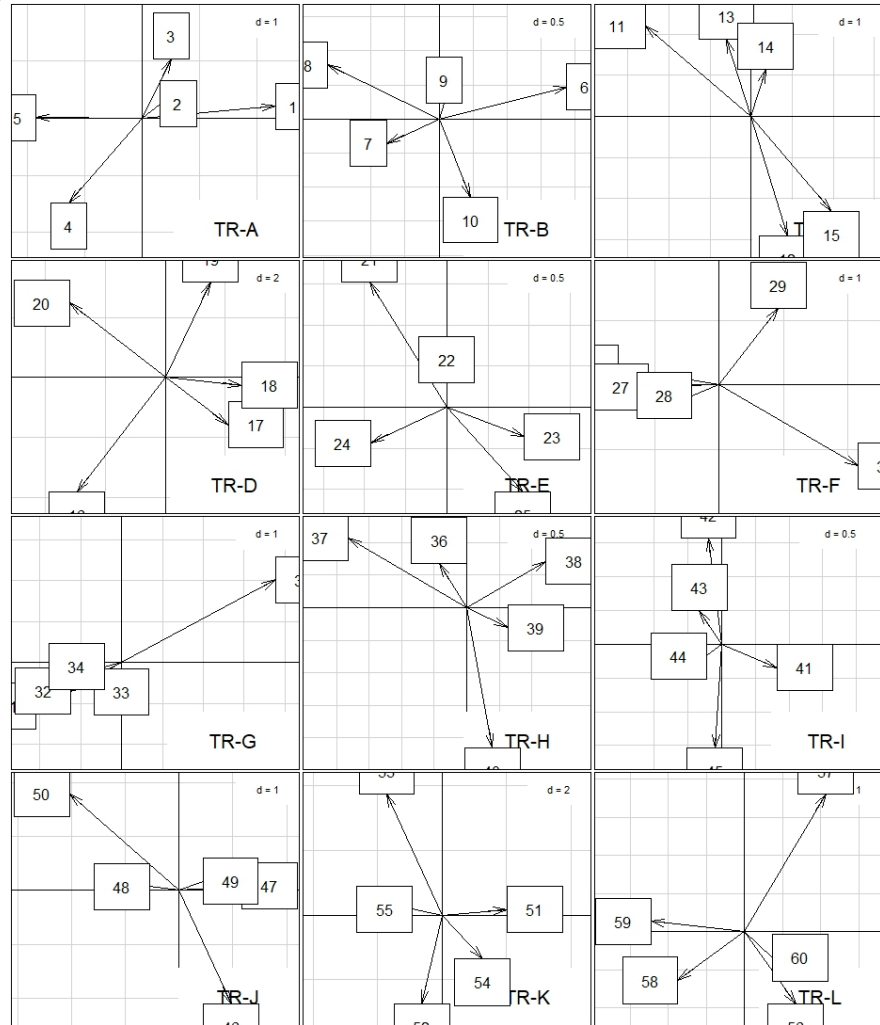
Cada cuadro dentro de los paneles representa una variable medida bajo ese tratamiento, y las flechas indican la dirección y fuerza de las relaciones entre ellas. La longitud y orientación de las flechas reflejan cómo las variables están correlacionadas dentro de cada tratamiento, destacando cuáles variables tienen una mayor influencia o son más determinantes en la estructura interna de ese tratamiento.

Observando la imagen, se pueden notar diferencias y similitudes en las configuraciones internas entre los tratamientos. Por ejemplo, en TR-A, las réplicas 2, 3 y 4 parecen estar estrechamente relacionadas, formando un grupo cohesionado que sugiere una estructura interna bastante definida. En TR-B, las réplicas 9 y 10 muestran diferencias, mientras que en TR-C, las réplicas 1, 13 y 14 están alineadas, indicando una estructura interna similar en estos tratamientos.

En TR-G, en cambio, las réplicas 32, 33 y 34 están más separadas en comparación con otras, sugiriendo una posible dispersión o menor cohesión entre los resultados dentro de ese tratamiento. Esta variabilidad en las estructuras internas podría explicar las diferencias observadas en los análisis estadísticos entre los diferentes tratamientos.

Este desglose revela que la estructura interna de las variables varía significativamente entre los tratamientos, lo que puede estar relacionado con cómo responden a los diferentes biofertilizantes y condiciones experimentales. Las diferencias en la configuración interna sugieren que algunos tratamientos tienen variables más interrelacionadas y estructuras más definidas, mientras que otros muestran mayor dispersión, lo que puede influir en los resultados globales del análisis STATIS y en la interpretación de las diferencias entre tratamientos.

Figura 4.6. Intraestructura



El contraste entre el Compromiso y la intraestructura revela que mientras algunas variables, como PSECO, NH y LRAIZ, mantienen su importancia y relaciones coherentes tanto en el análisis global como en varios tratamientos específicos, otras variables muestran variaciones más evidentes. Por ejemplo, DTALLO tiene una influencia diferente en el compromiso, que no se refleja de manera uniforme en todos los tratamientos, sugiriendo que la respuesta de DTALLO puede ser más dependiente del contexto del tratamiento específico.

Este contraste es crucial para identificar qué tratamientos siguen el patrón común y cuáles se desvían. Por ejemplo, la dispersión observada en la intraestructura de TR-G podría explicar por qué este tratamiento contribuye de manera distinta en el análisis global. De manera similar,

las diferencias en la estructura interna de TR-A, donde las variables están más alineadas, podrían indicar un comportamiento más predecible y en línea con el compromiso general.

El contraste entre los resultados del test de Wilcoxon, la intraestructura, y la interestructura sugiere que las diferencias estadísticamente significativas identificadas por Wilcoxon son reflejadas y explicadas por la estructura interna de los tratamientos y las relaciones entre ellos a nivel global. Las similitudes y diferencias estructurales detectadas en el análisis STATIS proporcionan un contexto para entender cómo y por qué ciertos tratamientos muestran diferencias significativas. Este enfoque integrado permite una visión más completa de los efectos de los biofertilizantes y aditivos en las diferentes variedades de rábano, asegurando que los patrones estadísticos observados estén alineados con las dinámicas estructurales dentro y entre los tratamientos. En estos tratamientos, se observa que las variables como PSECO, NH, LRAIZ, DTALLO, y PBULBO no solo muestran diferencias significativas en los análisis de Wilcoxon, sino que también están alineadas y estructuralmente integradas tanto en la intraestructura de los tratamientos individuales como en la interestructura a nivel global. Esto indica que los patrones de variabilidad observados en el análisis STATIS respaldan las diferencias significativas detectadas por Wilcoxon, proporcionando una comprensión completa de cómo los tratamientos afectan las variables clave en las diferentes variedades de rábano.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

El uso del test de Kruskal-Wallis ayudó a establecer que no todos los biofertilizantes tienen el mismo nivel de efectividad. Los resultados señalaron diferencias estadísticamente significativas en el impacto sobre las variables de crecimiento como altura, peso del bulbo, y tasa de

supervivencia de las plantas, evidenciando que algunos tratamientos son considerablemente más eficaces que otros.

STATIS reveló complejidades entre los tratamiento y las variables de crecimiento que no serían detectables con análisis univariantes. Este enfoque multivariante permitió identificar qué combinaciones de variables de crecimiento responden mejor a ciertos biofertilizantes, resaltando aquellos tratamientos que son efectivos en múltiples dimensiones del desarrollo de las plantas.

RECOMENDACIONES

Para una mayor robustez en los resultados, es aconsejable integrar pruebas estadísticas adicionales que puedan manejar datos no paramétricos y multivariantes en futuras investigaciones, para así confirmar y expandir los hallazgos actuales.

Basado en la eficacia observada, se recomienda la implementación de los tratamientos más exitosos en programas agrícolas que busquen mejorar específicamente las variables de crecimiento más afectadas, como la biomasa aérea o la salud radicular, adaptando el uso según las necesidades específicas del cultivo y las condiciones del suelo.

Referencias

- Ajibade, S., Simon, B., Gulyás, M., & Bálint, C. (2023). Sustainable intensification of agriculture as a tool to promote food security: A bibliometric analysis. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1101528. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1101528>
- Al-Quwaie, D. A. (2024). Antifungal activity of zinc nanoparticles biosynthesized by *Paenibacillus polymyxa* D41 provides potent control against *Fusarium culmorum* in wheat. *Journal of Plant Pathology*, 106(2), 671-682. <https://doi.org/10.1007/s42161-024-01607-1>
- Burkart, M. R. (2007). Diffuse pollution from intensive agriculture: Sustainability, challenges, and opportunities. *Water Science and Technology*, 55(3), 17-23. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.067>
- Christensen, S, N., Wood, A., W, A., Voisin, N., Nathalie, Lettenmaier, Dennis, P., Palmer, R., & N, R. (2004). The Effects of Climate Change on the Hydrology and Water Resources of the Colorado River Basin. *Climatic Change*, 62, 337. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000013684.13621.1f>
- Cortés-Hernández, F. del C., Alvarado-Castillo, G., Sánchez-Viveros, G., Cortés-Hernández, F. del C., Alvarado-Castillo, G., & Sánchez-Viveros, G. (2023). *Trichoderma* spp., una alternativa para la agricultura sostenible: Una revisión. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 25(2), 73-87. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v25n2.111384>
- Cuadras Berrelleza, A., Guevara, V., Guevara, H., López, J., & Barrientos, J. (2021). Agricultura intensiva y calidad de suelos: Retos para el desarrollo sustentable en Sinaloa. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12, 1401-1414. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i8.2704>

- Francaviglia, R., Almagro, M., & Vicente-Vicente, J. L. (2023). Conservation Agriculture and Soil Organic Carbon: Principles, Processes, Practices and Policy Options. *Soil Systems*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/soilsystems7010017>
- Francis, C. A., Harwood, R. R., & Parr, J. F. (1986). The potential for regenerative agriculture in the developing world. *American Journal of Alternative Agriculture*, 1(2), 65-74. <https://doi.org/10.1017/S0889189300000904>
- Gaibor Ramírez, F. G. (2011). *Evaluación de la eficacia de cuatro fertilizantes orgánicos foliares en tres dosis y dos épocas de aplicación en el rendimiento del cultivo de brócoli (brassica oleracea var. Itálica) en macají, cantón Riobamba, Provincia Chimborazo*. Escuela Superior Politécnica De Chimborazo.
- Heider, K., Rodriguez Lopez, J. M., Bischoff, A., Balbo, A. L., & Scheffran, J. (2023). Toward climate-resilient and biodiverse agriculture in the Mediterranean region: Experiences and perceptions of farmers engaged in sustainable food production. *Organic Agriculture*, 13(4), 513-529. <https://doi.org/10.1007/s13165-023-00444-3>
- Hobbs, J., Katzfuss, M., Nguyen, H., Yadav, V., & Liu, J. (2024). Functional analysis of variance (ANOVA) for carbon flux estimates from remote sensing data. *Geoscientific Model Development*, 17, 1133-1151. <https://doi.org/10.5194/gmd-17-1133-2024>
- Ibáñez, A., Garrido-Chamorro, S., Vasco-Cárdenas, M. F., & Barreiro, C. (2023). From Lab to Field: Biofertilizers in the 21st Century. *Horticulturae*, 9(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9121306>

- Jiménez-Tobón, D., Vahos-Posada, D., Galo-Molina, J., & Ríos-Osorio, L. (2023). Efecto del uso de biofertilizantes sobre la productividad agrícola: Revisión sistemática. *Hechos Microbiológicos*, 13. <https://doi.org/10.17533/udea.hm.v13n2a05>
- Kamenetzky, M., & Maybury, R. H. (1989). Agriculture in harmony with nature. *Science and Public Policy*, 16(2), 73-82. <https://doi.org/10.1093/spp/16.2.73>
- Kundzewicz, Z., Mata, L., Arnell, N., Doll, P., Jiménez, B., Miller, K., Oki, T., Şen, Z., & Shiklomanov, I. (2008). The Implications of Projected Climate Change for Freshwater Resources and Their Management. *Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques*, 53. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.1.3>
- Lata, S., Jha, A., Sharma, M., Dhawan, S., & Damathia, B. (2023). *Industrial Sustainability: Economics, Cost, and Bioavailability of Biofertilizers* (pp. 363-385). https://doi.org/10.1007/978-981-99-3561-1_19
- Lebano, I., Fracchetti, F., Vigni, M. L., Mejia, J. F., Felis, G., & Lampis, S. (2024). MALDI-TOF as a powerful tool for identifying and differentiating closely related microorganisms: The strange case of three reference strains of *Paenibacillus polymyxa*. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50010-w>
- Li, J., & Jensen, S. E. (2008). Nonribosomal Biosynthesis of Fusaricidins by *Paenibacillus polymyxa* PKB1 Involves Direct Activation of a d-Amino Acid. *Chemistry and Biology*, 15(2), 118-127. <https://doi.org/10.1016/j.chembiol.2007.12.014>

- Liu, X. (2023). Sustainable intensification: A historical perspective on China's farming system. *Farming System*, 1(1). <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2023.100001>
- Marques, L. L., Arboleda, A. V., Gonzalez, H., & Arias, A. G. (2000). *Análisis de la estructura común de varias tablas de datos a través de diferentes técnicas factoriales*.
- McKight, P., & Najab, J. (2010). *Kruskal-Wallis Test* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1002/9780470479216.corpsy0491>
- Menacho Chiok, C. (2009). Análisis de Tablas Múltiples de Datos: El Método STATIS. *Anales Científicos*, 70(3). <https://doi.org/10.21704/ac.v70i3.518>
- Morel López, E., Pistilli, R. E., Barrios Valiente, E., Caballero Casuriaga, O., Servin, A., Dasilva, M. O., Lugo, W., Huerta, Á., Morel López, E., Pistilli, R. E., Barrios Valiente, E., Caballero Casuriaga, O., Servin, A., Dasilva, M. O., Lugo, W., & Huerta, Á. (2021). Eficacia de biofertilizantes en la producción de variedades de fréjol. *Idesia (Arica)*, 39(3), 13-19. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292021000300013>
- Muñoz Vera, G. I. (2018). *“Evaluación de la eficacia del biofertilizante orgánico «Biol mineralizado» en el rendimiento del cultivo de col morada (Brassica oleracea) en la zona de Babahoyo”* [bachelorThesis, Babahoyo: UTB,2018]. <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/5182>
- Navarro Arenas, M. (2021). Desarrollo, estabilidad y eficacia de biofertilizantes para la mejora del cultivo de plantas de tomate y maíz [Ph.D. Thesis, Universitat de Barcelona]. En *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. <https://www.tdx.cat/handle/10803/674013>

- Park, S.-Y., Kim, R., Ryu, C.-M., Choi, S.-K., Lee, C.-H., Kim, J.-G., & Park, S.-H. (2008). Citrinin, a mycotoxin from *Penicillium citrinum*, plays a role in inducing motility of *Paenibacillus polymyxa*. *FEMS Microbiology Ecology*, 65(2), 229-237. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2008.00492.x>
- Patil, S. (2024). Use of «Bokashi» (compost) technique in Indian scenario. 3013(1). <https://doi.org/10.1063/5.0202212>
- Patowary, R., & Deka, H. (2020). *Paenibacillus*. En *Beneficial Microbes in Agro-Ecology: Bacteria and Fungi* (pp. 339-361). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823414-3.00017-4>
- Plantes, H. L. des. (1976). *Structuration des tableaux à trois indices de la statistique*. Université des Sciences et Techniques du Languedoc.
- Prasetyani, E. (2023). Uji Efikasi *Trichoderma* spp dan *Paenibacillus polymyxa* Terhadap Penyakit Bercak Coklat dan Blas Padi. *Jurnal AgroSainTa: Widyaiswara Mandiri Membangun Bangsa*, 7, 47-54. <https://doi.org/10.51589/ags.v7i2.3126>
- Pretty, J., Toulmin, C., & Williams, S. (2011). Sustainable intensification in African agriculture. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 9, 5-24. <https://doi.org/10.3763/ijas.2010.0583>
- Selvaraju, R., Bernardi, M., & Gommès, R. (2011). Climate science in support of sustainable agriculture and food security. *Climate Research*, 47, 95-110. <https://doi.org/10.3354/cr00954>
- Shanavas, J. (2014). SCREENING AND IDENTIFICATION OF POTENTIAL TRICHODERMA SP. AGAINST SOIL BORNE PATHOGENS OF VANILLA (*VANILLA PLANIFOLIA*). *Indian J. Agric. Res.*

- Snedecor, G. W., & Cochran, W. G. (1980). *Statistical Methods* (Wiley&Sons, Incorporated,). <https://www.iberlibro.com/9788126551385/Statistical-Methods-William-Cochran-George-8126551380/plp>
- Sopialena, S., Sofian, Wiranata, A., & Tantiani, D. T. (2021). Potential of *Paenibacillus polymyxa* bacteria and *Trichoderma* sp. As biological pesticides to control maize leaf blight (*Zea mays* L). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 800, 012027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/800/1/012027>
- Stellfeldt, A., Valdés, R., & Palazón, P. (2019, mayo). *Cómo evaluar el efecto fertilizante de un microorganismo*. International Agriculture Microorganism Forum, España. www.phytoma.com
- Timmusk, S., Grantcharova, N., & Wagner, E. G. H. (2005). *Paenibacillus polymyxa* Invades Plant Roots and Forms Biofilms. *Applied and environmental microbiology*, 71, 7292-7300. <https://doi.org/10.1128/AEM.71.11.7292-7300.2005>
- van Antwerpen, R., Watt, D. A., Gillespie, W., & van Heerden, P. D. R. (2024). Promoting Adoption of Soil Health Related Regenerative Agriculture Practices Amongst Small-Scale Sugarcane Grower Communities in South Africa. *Sugar Tech*, 26(3), 635-638. <https://doi.org/10.1007/s12355-024-01383-3>
- Xia, X., Wang, Q., Guo, K., Yuan, G., Deng, T., Zhao, Z., Guo, Q., Wu, K., Chen, B., & Pan, Y. (2024). Combined application of resistance inducer and *Trichoderma* control two tobacco soil-borne diseases by regulating the field soil microbial composition. *Journal of Phytopathology*, 172(3). <https://doi.org/10.1111/jph.13333>

Xu, H.-L., Wang, R., & Mridha, M. A. U. (2001). Effects of organic fertilizers and a microbial inoculant on leaf photosynthesis and fruit yield and quality of tomato plants. *Journal of Crop Production*, 3(1), 173-182.
https://doi.org/10.1300/J144v03n01_15

Zaib, M., Zubair, M., Aryan, M., Abdullah, M., Manzoor, S., Masood, F., & Saeed, S. (2023). *A Review on Challenges and Opportunities of Fertilizer Use Efficiency and Their Role in Sustainable Agriculture with Future Prospects and Recommendations*. 1-14.