

**UNIVERSIDAD NACIONAL
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO
MAESTRÍA EN AGRICULTURA ECOLÓGICA**

**BACTERIAS PROMOTORAS DE CRECIMIENTO VEGETAL
EN ASOCIACIÓN CON EL CULTIVO DE ARROZ (*Oryza
sativa* L.) EN CAÑAS, GUANACASTE, COSTA RICA**

Jhonson Jesús Mora Mata

Heredia, Costa Rica, 2026.

Tesis sometida a consideración del Tribunal Examinador del Posgrado en Agricultura Ecológica de la Escuela de Ciencias Agrarias, para optar por el grado de *Magister Scientiae* en Agricultura Ecológica.

**BACTERIAS PROMOTORAS DE CRECIMIENTO VEGETAL
EN ASOCIACIÓN CON EL CULTIVO DE ARROZ (*Oryza
sativa* L.) EN CAÑAS, GUANACASTE, COSTA RICA**

Jhonson Jesús Mora Mata

Tesis presentada para optar al grado de *Magister Scientiae* en Agricultura Ecológica. Cumple con los requisitos establecidos por el Sistema de Estudios de Posgrado de la Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

MIEMBROS DEL TRIBUNAL EXAMINADOR

[PhD. Mayela Coto Chotto/ Dr. Luis A. Miranda Calderón, Dr. Francisco San Lee Campos, Dr.
Rafael Arias Ramírez]
Representante del Consejo Central de Posgrado

Ph.D. Gerardo Cerdas Vega
Coordinadora Maestría en Agricultura Ecológica

Dr. Rafael Orozco Rodríguez
Tutor (a) de tesis

M.Sc. Mairon Madriz Martínez
Miembro del Comité Asesor

Dr. Fabricio Dario Cassan
Miembro del Comité Asesor

Jhonson Jesús Mora Mata
Sustentante

Descriptores

Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), arroz, sostenibilidad, Eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN), biodisponibilidad.

Resumen

El arroz (*Oryza sativa* L.) es un cultivo clave para la seguridad y soberanía alimentaria de Costa Rica, sin embargo, su producción enfrenta altos costos y una fuerte dependencia de fertilización nitrogenada inorgánica importada, con implicaciones económicas y ambientales. Este estudio evaluó el efecto combinado de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), mediante el inoculante comercial Nitrobacter®, y dosis reducidas de N sobre componentes de crecimiento, rendimiento y rentabilidad del cultivo de arroz variedad Lazarroz FL en Cañas, Guanacaste. Se estableció un ensayo de campo en un diseño completamente aleatorizado (DCA) con 10 tratamientos y 4 repeticiones (microparcels de 6 m²), comparando, testigo absoluto; 100% N (200 kg N·ha⁻¹ = 435 kg urea·ha⁻¹); reducciones de N al 85% (170 kg N·ha⁻¹ = 370 kg urea·ha⁻¹) y 60% (120 kg N·ha⁻¹ = 261 kg urea·ha⁻¹), con y sin Nitrobacter® (5,0 y 6,5 L·ha⁻¹). Se midieron altura, índice de clorofila (SPAD), materia seca, N foliar (Kjeldahl), esterilidad, peso de 100 granos y rendimiento, se realizó ANOVA con comparación de medias (DGC). Los tratamientos 85% N y 100% N, así como 60% N combinado con Nitrobacter® (ambas dosis), alcanzaron los mayores rendimientos (>3,5 t·ha⁻¹), mientras los tratamientos sin fertilización presentaron los más bajos (<3,1 t·ha⁻¹). La combinación 60% N + 6,5 L·ha⁻¹ de Nitrobacter® igualó estadísticamente al 100% N y lo superó en 4,22% en rendimiento, evidenciando compensación en estado nitrogenado y desempeño agronómico. En contraste, Nitrobacter® no mejoró el rendimiento al combinarse con la dosis de 85% N. En el análisis económico parcial, la mayor utilidad correspondió a 85% N sin inoculante, con un margen 10,5% superior a 100% N, el mejor tratamiento inoculado fue 60% N + 6,5 L·ha⁻¹, con utilidad cercana al 100% N, aunque afectada por mayores costos de aplicación. Los resultados respaldan que es posible reducir N mineral hasta en 40% y mantener productividad y rentabilidad mediante PGPR, favoreciendo una producción más sostenible.

Abstract

Rice (*Oryza sativa* L.) is a key crop for food security and sovereignty in Costa Rica; however, its production faces high costs and a strong dependence on imported inorganic nitrogen fertilization, with economic and environmental implications. This study evaluated the combined effect of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR), through the commercial inoculant Nitrobacter®, and reduced N rates on growth components, yield, and profitability of the Lazarroz FL rice variety in Cañas, Guanacaste. A field trial was established using a completely randomized design (CRD) with 10 treatments and 4 replications (6 m² microplots), comparing, an absolute control; 100% N (200 kg N·ha⁻¹ = 435 kg urea·ha⁻¹); reduced N rates of 85% (170 kg N·ha⁻¹ = 370 kg urea·ha⁻¹) and 60% (120 kg N·ha⁻¹ = 261 kg urea·ha⁻¹), with and without Nitrobacter® (5.0 and 6.5 L·ha⁻¹). Plant height, chlorophyll index (SPAD), dry matter, foliar N (Kjeldahl), sterility, 100-grain weight, and yield were measured, and ANOVA with mean comparison (DGC) was performed. The 85% N and 100% N treatments, as well as 60% N combined with Nitrobacter® at both doses, achieved the highest yields (>3.5 t·ha⁻¹), whereas the unfertilized treatments showed the lowest values (<3.1 t·ha⁻¹). The combination of 60% N + 6.5 L·ha⁻¹ of Nitrobacter® was statistically equivalent to 100% N and exceeded it by 4.22% in yield, showing compensation in nitrogen status and agronomic performance. In contrast, Nitrobacter® did not improve yield when combined with the 85% N rate. In the partial economic analysis, the highest profit corresponded to 85% N without inoculant, with a margin 10.5% higher than 100% N, the best inoculated treatment was 60% N + 6.5 L·ha⁻¹, with profitability close to that of 100% N, although affected by higher application costs. The results support that mineral N can be reduced by up to 40% while maintaining productivity and profitability through PGPR, thereby promoting more sustainable production.

Agradecimiento

A Dios por la bendición de la vida y la dicha de continuar aprendiendo.

A mi familia por el apoyo incondicional en cada una de las etapas de mi vida.

A mi tutor y mentor Dr. Rafael Orozco Rodríguez por su apoyo y consejos en mi etapa de formación profesional.

A mis lectores M.Sc. Mairon Madriz Martínez y Dr. Fabricio Cassan por sus oportunas recomendaciones y apoyo en la elaboración de esta investigación.

Al Programa Biotecnología Vegetal y Recursos Genéticos para el Fitomejoramiento (BIOVERFI) por su apoyo administrativo y logístico.

A Vicerrectoría de Investigación por el financiamiento parcial de la investigación.

Dedicatoria

A Dios, mi familia y amigos por siempre acompañarme.

Índice

Capítulo I: Introducción	18
Problemática.....	3
Justificación	5
Objetivo general.....	8
Objetivos específicos	8
Capítulo II: Marco Teórico.....	9
Situación actual del cultivo	9
Fertilización inorgánica en el cultivo de arroz	10
Importancia del N	10
Uso de fertilizantes nitrogenados	11
Producción ecológica y sostenible	12
Microorganismos promotores de crecimiento vegetal (PGPR).....	13
Producción de fitohormonas.....	13
Solubilización de fosfatos.....	14
Control de plagas y enfermedades	14
Eficiencia en el uso de N	15
Fijación biológica de N atmosférico	15
El género <i>Azospirillum</i>	16
El género <i>Azotobacter</i>	17
Inoculantes microbianos	17
Capítulo III: Metodología	19
Localización geográfica del estudio.....	19
Caracterización inicial del suelo	20
Material genético.....	21
Inoculante microbiano	21
Descripción de los tratamientos	21
Preparación del terreno	23
Establecimiento de las parcelas	23
Siembra	23
Aplicación de los tratamientos biológicos	23
Fertilización química.....	24
Manejo de malezas, plagas y enfermedades.....	25

Recuento de microorganismos diazotróficos en la rizosfera de la planta.....	26
Diseño experimental	28
Análisis estadístico	29
Análisis económico parcial de los tratamientos	30
Costo de la aplicación de urea por hectárea.....	31
Costo de la aplicación Nitrobacter® por hectárea	31
Costo total del plan de fertilización nitrogenada	32
Ingreso bruto por hectárea	32
Utilidad parcial neta	32
Capítulo IV: Resultados y discusión	33
Variables asociadas a crecimiento	33
<i>Altura</i>	33
Índice de clorofila	35
Materia seca	37
Correlación entre índice de clorofila y N foliar	40
Variables asociadas a rendimiento	44
Esterilidad	44
Peso de 100 granos de arroz	46
Rendimiento	47
Análisis de componentes principales.....	55
Costo económico del uso de Nitrobacter® y dosis reducidas de urea dentro de un plan de fertilización inorgánica	58
Costo de la aplicación de urea por hectárea.....	58
Costo de la aplicación de Nitrobacter® por hectárea	60
Costo de la aplicación de Nitrobacter® y urea por hectárea.....	61
Análisis económico de los tratamientos evaluados	63
Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones	69
Recomendaciones a investigaciones futuras	70
Anexos.....	92

Lista de cuadros

Tabla 1. Inoculantes microbianos disponibles en el mercado de Costa Rica.....	18
Tabla 2. Descripción de los tratamientos implementados	22
Tabla 3. Dosificación de urea en los tratamientos a utilizar en la investigación	24
Tabla 4. Costo de la aplicación de urea por hectárea	59
Tabla 5. Costo de la aplicación de Nitrobacter® por hectárea.....	60
Tabla 6. Costo de la aplicación de Nitrobacter® y urea por hectárea.....	62
Tabla 7. Utilidad parcial neta	63

Lista de figuras

Figura 1. Ubicación de la EEEJN, Cañas, Guanacaste.	20
Figura 2. Croquis de la disposición de las microparcels mediante un diseño completamente al azar (DCA)	28
Figura 3. Altura de plantas de arroz a los 77 ddt.	33
Figura 4. Índice de clorofila (SPAD) medido a los 35 y 84 ddt.	36
Figura 5. Materia seca de plantas de arroz	38
Figura 6. Correlación entre N foliar (%) e índice de clorofila a los 35 y 84 ddt.....	40
Figura 7. Altura vs Índice de clorofila (SPAD, 35ddt), burbuja= Materia seca	42
Figura 8. Esterilidad de granos de arroz.....	44
Figura 9. Peso de 100 granos de arroz (g).....	46
Figura 10. Rendimiento de arroz (t/ha).	48
Figura 11. Rendimiento vs esterilidad, burbuja= Peso 100 granos.....	54
Figura 12. Análisis de componentes principales (ACP).	56

Lista de anexos

Anexo 1. Análisis químico de suelo base (CIA-UCR).....	92
Anexo 2. Análisis químico de suelo por tratamiento – 120 días (CIA-UCR).....	92
Anexo 3. Análisis químico foliar – 35 ddt (N% y C%) (CIA-UCR).....	93
Anexo 4. Análisis químico foliar – 70 ddt (N% y C%) (CIA-UCR).....	93
Anexo 5. Calidad del inoculante Nitrobacter® (UFC/mL; CIA-UCR)	94
Anexo 6. Comportamiento/recuento de fijadores de N (UFC/g) – base, 35 ddt y 120 ddt (CIA-UCR)	95
Anexo 7. ANOVA / modelo: Altura.....	96
Anexo 8. ANOVA / modelo mixto: Índice de clorofila (SPAD) 35 y 84 ddt.....	96
Anexo 9. ANOVA / modelo: Materia seca.....	97
Anexo 10. Correlación SPAD vs N foliar (%) (35 y 84 ddt).....	97
Anexo 11. ANOVA / modelo: Esterilidad.....	98
Anexo 12. ANOVA / modelo: Peso de 100 granos	98
Anexo 13. ANOVA / modelo: Rendimiento.....	99

Lista de abreviaturas

ABA	Ácido abscísico
ACC	1-aminociclopropano-1-carboxilato
ACP	Análisis de componentes principales
AIA	Ácido indolacético
ANOVA	Análisis de varianza
BIC	Criterio de información bayesiano
CH ₄	Metano
CIA	Centro de Investigaciones Agronómicas
CONARROZ	Corporación Nacional Arroceras
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂ e	Dióxido de carbono equivalente
DCA	Diseño completamente al azar
DCC	Dirección de Cambio Climático
DDT	Días después del trasplante
DDS	Días después de la siembra
DGC	Di Rienzo, Guzmán y Casanoves
ECA	Escuela de Ciencias Agrarias
EEEJN	Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez
EF1FR	Factor de emisión directo para N ₂ O en arroz bajo riego intermitente
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FAOSTAT	Base de datos estadísticos de la FAO
GA ₃	Ácido giberélico
GEI	Gas de efecto invernadero
GEIs	Gases de efecto invernadero
HLPE	High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition
IAEA	Organismo Internacional de Energía Atómica
INTA	Instituto Nacional de Transferencia Agropecuaria
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
K	Potasio
KCl	Cloruro de potasio
N	Nitrógeno
NAMAs	Acciones de Mitigación Nacionalmente Apropriadas
NH ₃	Amoniaco

NH_4^+	Amonio
N_2O	Óxido nitroso
NO	Óxido nítrico
NO_3^-	Nitrato
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica
ONU	Organización de las Naciones Unidas
P	Fósforo
PCR	Reacción en cadena de la polimerasa
PGPR	Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal
qPCR	Reacción en cadena de la polimerasa en tiempo real
SPAD	Soil Plant Analysis Development
TSP	Triple superfosfato
UCR	Universidad de Costa Rica
UFC	Unidades formadoras de colonias
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos

Capítulo I: Introducción

El arroz (*Oryza sativa* L.) es uno de los cultivos de mayor importancia en la alimentación de millones de personas en todo el mundo y un producto fundamental en la dieta de la población de diferentes continentes (Organismo Internacional de Energía Atómica [OIEA], 2024). El principal productor global es el continente asiático con cerca del 90.5% de la producción, seguido de América con una producción de tan sólo el 5.1% (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2023).

La producción nacional para el periodo 2022-2023 fue de 95.000 toneladas (t) al año, con un consumo total de 262.062 toneladas y un consumo per cápita de aprox. 50,27 kg (Corporación Nacional Arrocera [CONARROZ], 2023 y Departamento de Agricultura de los Estados Unidos [USDA], 2023). Lo anterior implica que la producción local apenas cubre el 40% de la demanda interna, siendo necesario importar la mayor parte del arroz consumido en Costa Rica, en un escenario donde los aranceles a la importación pasaron de un 35% a un 4% en el periodo 2022.

Según CONARROZ (2023), el arroz se cultiva en condiciones de riego y secano en todas las regiones de Costa Rica. En el boletín mensual de CONARROZ (2025) se menciona que en el periodo 2022-2023 se sembraron cerca de 24.258 ha, y en el 2023-2024 cerca de 13.709 ha. Es decir, que se dio una disminución de 10.549 ha en el periodo de un año, esto debido principalmente a decisiones sociopolíticas. La región Chorotega es la que posee mayor cantidad de hectáreas dedicadas a la producción arrocería, con un total de 8.192 ha (59,76%), seguido de la región Brunca con 2.084 ha (15,20%), y la región Huetar Norte con 1.971 ha (14,38%).

De acuerdo con Bertsch (2009), el cultivo requiere de 100 kg nitrógeno (N); 18 kg fósforo (P) y 115 kg potasio (K).ha⁻¹ para producir 5 toneladas de granos. Estas necesidades del cultivo son

mayoritariamente aportadas por fertilizantes minerales, de origen químico o inorgánicos, donde las fuentes nitrogenadas son aquellas utilizadas con mayor frecuencia. Según FAO (2025), el uso de fertilizantes de este tipo fue de 190 millones de toneladas en el año 2023, donde el N representó cerca del 58 % del total, con aproximadamente 112 millones de toneladas aportadas.

La aplicación constante de fuentes químicas de N se considera una práctica que contribuye a la emisión de gases efecto invernadero y calentamiento global, contaminación de las fuentes de agua subterráneas, así como a la degradación y pérdida de fertilidad en los suelos, lo que disminuye impacta en la disponibilidad de recursos naturales para el suministro de alimentos (Vilca, 2018).

La Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2022) estima que para el año 2050 la población mundial será de 9.700 millones de personas y la demanda por alimentos se incrementará en un 70%. Esta situación enciende las alarmas si se toma en consideración que el área destinada para la producción de cultivos disminuirá considerablemente en todo el mundo. Ante este panorama, se avizora que serán necesarias tecnologías de producción más amigables con el medioambiente y que permitan incrementar la eficiencia en el uso de los fertilizantes de naturaleza química y un mayor aprovechamiento de los recursos naturales con el fin de alcanzar la seguridad alimentaria (Pérez, Leyva y Gómez, 2018).

Una forma de producción sostenible se corresponde con el uso de microorganismos promotores del crecimiento vegetal (del inglés plant growth promoting rhizobacteria o de la sigla PGPR), capaces de hacer más eficiente la captación de nutrientes por las plantas. Proceso que de manera general se define como bio-disposición de nutrientes minerales (Alzate Zuluaga et al., 2024).

Autores como Alcedo y Reyes (2018) y Ehinmitan et al. (2024) mencionan que las PGPR son un grupo de microorganismos que promueve el crecimiento debido a su capacidad para estimular directamente el desarrollo de las plantas a través de mecanismos fisiológicos o metabólicos, tales como: la fijación biológica de N atmosférico (García de Salamone, 2012); producción de ácidos orgánicos o

metabolitos secundarios, como antimicrobianos, así como la biosíntesis de fitohormonas y otros compuestos con actividad biológica (Leal, et al., 2018); la solubilización de fosfatos (Mamarandi y Ojeda, 2019), la rizoestimulación o incremento del área radical (Alcedo y Reyes, 2018) y la inducción de resistencia sistémica a fitopatógenos por parte de las plantas (Alcedo y Reyes, 2018).

Problemática

Entre el año 2021 y el 2024, la actividad arrocera en nuestro país experimentó una reducción en el número de productores y el área sembrada. El número de productores pasó de 534 en 2021–2022 a 421 en 2022–2023, equivalente a una caída del 21%. El área sembrada disminuyó de 35.301 ha en 2021–2022 a 13.709 ha en 2023–2024, una reducción acumulada de más del 60% en dos ciclos agrícolas (CONARROZ, 2023; 2025).

Las causas principales de este fenómeno son multifactoriales pero se atribuyen principalmente a condiciones desfavorables de mercado, cambio en los aranceles a la importación (Ruta del Arroz), altos costos de los insumos (FAO, 2022 y Vallejo y Blanco, 2020), variación en temperatura y precipitaciones producto del cambio climático. Las últimas condiciones en particular generan desarrollos inadecuados en las plantas y pérdida de la productividad a nivel de cultivo. El arroz es uno de los cultivos más susceptibles a las variaciones climáticas (Xiaoming y Atul, 2021; Vignola, et al., 2018).

El arroz es uno de los cultivos más intensivos en emisiones de gases de efecto invernadero (GEIs) dentro del sistema alimentario global. Las prácticas de cultivo inundado generan enormes cantidades de metano (CH_4), que representan entre el 1,3 y 1,8 % del total de las emisiones mundiales de GEIs, y aproximadamente el 10 % de las emisiones agrícolas a nivel mundial (Hosseiniyan Khatibi et al., 2025). La aplicación de fertilizantes nitrogenados (especialmente en exceso) es una de las principales fuentes antropogénicas de N_2O desde suelos agrícolas (U.S. Environmental Protection Agency [EPA], 2025). El

N₂O tiene un poder de calentamiento de 273 veces al del CO₂ (AR6), por lo que pequeñas variantes en su emisión pueden traducirse en incrementos considerables de CO₂ equivalente (Forster et al., 2021). En 2011, las emisiones anuales totales mundiales de GEI procedentes del cultivo del arroz sumaron 522 Mt de CO₂e (equivalentes), aproximadamente el 10% de las emisiones totales de la agricultura en el mismo año.

Del total de emisiones de GEIs provocadas por el sector “Agricultura, Silvicultura y otros usos de la tierra”, en el año 2021 en Costa Rica, el arroz produjo un total de 11.93 Gg de CH₄ (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2018; MINAE- DCC, 2024). En el inventario solo se mencionan que en el sector agrícola nacional el 62,3% de los GEI corresponde a fermentación entérica (ganadería principalmente) seguido por óxido nitroso (N₂O) con un 20%. En el caso específico del arroz no se cuantifican las emisiones de óxido nitroso (N₂O), sin embargo, un análisis global muestra que “bajo el uso intensificado de inundaciones intermitentes, las emisiones de óxido nitroso procedentes de las plantaciones de arroz en todo el mundo podrían ser de 1,5 a 2,4 millones de toneladas” (Environmental Defense Fund, 2018). Además, una buena parte de estas emisiones se generan por los fertilizantes nitrogenados, los cuales se volatilizan produciendo N₂O. La magnitud del problema puede inferirse debido a la alta aplicación de fertilizantes, que se calcula en cerca de 200 kg·ha⁻¹ de N (Vallejo y Blanco, 2020).

Se estima que la agricultura genera entre el 60 y el 70 % de las emisiones de N₂O producidas por la actividad humana, asociadas en gran medida al uso de los fertilizantes nitrogenados y se prevé que aumenten en un 50% para 2030 (FAO, 2002; Sánchez, 2019). Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico [OCDE] y FAO (2020), el uso actual de fertilizantes nitrogenados es muy ineficaz, un ejemplo de esto sucede en China, el mayor consumidor de fertilizantes de este tipo de todo el mundo; en donde al menos la mitad de N aplicado se pierde por volatilización y lixiviación y donde un

5-10% se pierde por infiltración y escorrentía. Cuando estos nutrientes llegan a los cuerpos de agua superficiales o subterráneas, ocurre el proceso de eutrofización, que genera un mayor desarrollo de las algas que afectan a otras plantas y animales acuáticos (FAO, 2002).

Por otro lado, la aplicación excesiva de fertilizantes nitrogenados ocasiona el cambio de las características físicas, químicas y biológicas del suelo, provocando su degradación y la consecuente pérdida de materia orgánica y diversidad biológica (FAO, 2002). También influye en la economía del productor, debido a los altos costos de inversión que determinan repetidas fertilizaciones en un ciclo de producción (Galindo, et al., 2020). En términos relativos y desde el punto de vista del manejo, el costo para producir una hectárea ronda los ₡1 651 907, equivalente a \$3.240,02 (1 \$ = 510 colones). El principal costo radica en los insumos como fertilizantes y plaguicidas. Este rubro alcanza un 55 % del total de costos, lo que equivale a ₡908 549 (CONARROZ, 2023).

Es importante mencionar que debido a la situación provocada por el COVID-19, crisis de los contenedores, energética y actuales conflictos a nivel mundial los precios de los insumos han aumentado en el último período de tiempo (Franco, et al., 2021). Para junio del 2020 la urea tenía un precio de \$202 la tonelada métrica y en septiembre del 2021 alcanzó los \$419; un aumento del 107% (Barquero, 2021). En enero del 2022 la tonelada métrica alcanzó un precio de \$846 (Index Mundi, 2022).

Al continuar los conflictos globales, no existe certidumbre sobre el comportamiento de los precios de los fertilizantes, lo que abre una ventana de oportunidad para investigar fuentes alternativas, complementarias de fertilización de los cultivos.

Justificación

Actualmente, se requieren formas de producción sostenibles que permitan mitigar el impacto ambiental y adaptarse a las condiciones climáticas y del mercado imperantes (Vallejo y Blanco, 2020).

Estas nuevas formas de producción alcanzan los objetivos en términos agrícolas, pero al mismo tiempo protegen los recursos naturales ante el aumento de la población y la disminución de las áreas cultivables, en el contexto de cambio climático. Un ejemplo de esta política se refleja en la creación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), los que buscan fomentar una agenda mundial para atender una serie de problemáticas globales hasta el año 2030. El objetivo 12 en particular, busca promover formas de producción y consumo responsables y el 13 generar acciones que disminuyan la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) e impacto ambiental (ONU, 2022).

En el país se han creado una serie de compromisos y acciones para reducir el impacto del cultivo de arroz en el medioambiente. Uno de ellos, como parte del Acuerdo Ministerial para la reducción de emisiones en el sector agropecuario, tiene como nombre “Acciones de Mitigación Nacionalmente Apropriadas o NAMAs” (Vallejo y Blanco, 2020). También, existe el Plan Nacional de Descarbonización de Costa Rica 2018-2050, que menciona en su eje 8 el “Fomento de sistemas agroalimentarios altamente eficientes que generen bienes de exportación y consumo local bajos en carbono” (Gobierno de Costa Rica, 2018).

Dentro de las actividades antes mencionadas, se destacan el uso de nuevas variedades mejoradas de arroz con manejo agronómico innovador; por ejemplo, en la implementación de nuevas prácticas de fertilización que reduzcan las emisiones de GEIs. Así, el uso de bacterias promotoras del crecimiento vegetal y en especial aquellas con capacidad de fijar N de la atmósfera o bio-disponer este elemento de manera más eficiente para las plantas desde el suelo, se consideran como alternativas sustentables y estrategias viables para el sector agrícola (Vallejo y Blanco, 2020).

El uso de bacterias fijadoras de N permite igualar los rendimientos para el cultivo de arroz, con una reducción de hasta un tercio (33%) en el uso de fertilizantes nitrogenados (Vanegas, Flórez y Uribe, 2011) o hasta un 50% en algunos casos (IDEAGRO, sf). Lo anterior supone un beneficio directo para el

ambiente por la disminución de la emisión de óxido nitroso a la atmósfera, menor degradación del suelo y reducida infiltración hacia las capas freáticas. Por otro lado, se considera económicamente más rentable. De acuerdo con la información previamente presentada, fertilizar una hectárea con urea tiene un costo de ₡367 000; mientras que, con el uso de bacterias promotoras del crecimiento o prácticas combinadas, se podría disminuir hasta cerca de ₡183 500.

Alrededor del mundo se han estado desarrollando investigaciones para desarrollar productos que contengan bacterias fijadoras de N como principio activo; por ejemplo, Llerena et al. (2021), estudiaron el efecto de diferentes concentraciones de *Azotobacter* sp. en el desarrollo y producción del cultivo de arroz y encontraron que concentraciones de producto de 1×10^9 UFC·mL⁻¹ aumentan la productividad del cultivo en un 42,9%. También, Mariuxi (2022), realizó una inoculación en el cultivo de arroz con un consorcio en base a *Pseudomonas fluorescens* + *Bradyrhizobium japonicum*, y la combinación aumentó en un 11,3% el rendimiento, como kg·ha⁻¹ en comparación con el tratamiento testigo no inoculado. No obstante, la tecnología está en proceso de validación en diversos cultivos, condiciones ambientales y diferentes tipos de suelos.

El producto Nitrobacter® producido por la empresa BIOECO en Costa Rica, ha sido utilizado en diferentes cultivos y regiones con resultados positivos. Por ejemplo, Villegas (2016) lo utilizó en el cultivo de melón (*Cucumis melo* L.), concluyendo que permite disminuir el uso de insumos nitrogenados en un 15%, aumentando el rendimiento en 11,2% y disminuyendo el costo de fertilización en un 2,02% en comparación con el tratamiento testigo (100% fertilización inorgánica). Zombado (2016), inocularon con Nitrobacter® y diferentes concentraciones de fertilizante nitrogenado en el cultivo de pasto Tanner y estrella africana, donde la inoculación aumentó en un 45% el rendimiento cuando se combinó con 50% de fertilizantes inorgánico.

Validar el uso de Nitrobacter® en el cultivo de arroz variedad Lazarroz FL, en la región Chorotega es de especial interés, debido a la falta de información en la que se considera la región de mayor producción nacional y de importancia para este alimento en la dieta nacional. Además, debido a la diversidad de condiciones ambientales, tipos de suelo y contextos sociales presentes en las áreas productoras de arroz en el territorio nacional, es necesario realizar ensayos de validación para verificar el desempeño de las PGPR y así promover su utilización en el cultivo. Con base en lo anterior, el presente trabajo pretende generar información para los productores agropecuarios ligados al cultivo de arroz que estén dispuestos a incorporar estas formas sostenibles de producción, por lo tanto, se plantean los siguientes objetivos:

Objetivo general

- Evaluar el efecto combinado de bacterias fijadoras de N y un fertilizante inorgánico nitrogenado sobre el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) variedad Lazarroz FL en crecimiento, rendimiento y costo de aplicación para el favorecimiento de la agricultura sustentable.

Objetivos específicos

- Estimar el crecimiento de plantas de arroz, en tratamientos de asociación con bacterias fijadoras de N y diferentes dosis de fertilizante inorgánico nitrogenado.
- Evaluar el rendimiento y sus componentes en plantas de arroz, en tratamientos de asociación con bacterias fijadoras de N y diferentes dosis de fertilizante inorgánico nitrogenado.
- Determinar el costo económico del uso de bacterias fijadoras de N y diferentes dosis de fertilizante inorgánico nitrogenado en un esquema de producción sustentable.

Capítulo II: Marco Teórico

Situación actual del cultivo

El cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) es de relevancia, ya que se trata de un alimento esencial en la dieta de cerca de tres mil millones de personas en todo el mundo (Poveda y Andrade, 2018). Según Rodríguez et al., (2022), el arroz es el cereal más sembrado en el mundo, el cual suple gran parte de la demanda alimenticia. Además, de esos tres mil millones de personas que subsisten del arroz, se menciona que el 90% pertenece al continente asiático, Rodríguez et al., (2022) citando a Torres y Martínez (2010) explica que “entre los países con mayor producción, en orden descendente, están: China, India, Indonesia, Bangladesh, Vietnam, Tailandia, Birmania, Filipinas y en nuestro continente, el caso de Brasil”. Este producto se considera un patrimonio cultural de muchas sociedades, y en Costa Rica, el consumo per cápita durante el período 2023/2024 fue de 48,18kg (CONARROZ, 2024).

Como se menciona anteriormente, el principal productor de arroz en el mundo es el continente asiático con cerca del 90.6% de la producción total, seguido por América (5.2%), África (3.5%), Europa (0.6%) y Oceanía (0.1%) de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2019). En Costa Rica, para el periodo 2023/2024 se registraron 238 productores en la actividad arrocería, se sembraron 13,709 ha y se obtuvo un rendimiento promedio de 4,8 tm/ha (p. 14). Además, se cultivaron 8,752 ha bajo sistema de riego y 4,975 ha en secano, representando el 64% y un 36% respectivamente. Desde el punto de vista geográfico, la región que más se dedica a la actividad arrocería es la Chorotega (73%), seguida por Huetar Norte (10%), Brunca con un 9%, la zona del Pacífico Central con un 7% de la producción y finalmente la región Huetar Atlántica con únicamente un 0,3% de la producción (CONARROZ, 2024).

Las variedades más utilizadas en la actualidad en el país corresponden a Lazarroz FL, que abarca aproximadamente el 42% del área sembrada total en el periodo de 2023/2024, seguida de Sen-6

también llamada Fortaleza FL con un 15% y en tercer lugar, está Sen-1/ Esperanza FL con un 10%.

Independientemente de la variedad, el principal costo en la producción es el asociado a los insumos (fertilizantes y plaguicidas), el que alcanza el 50% de los costos totales de producción (CONARROZ, 2024).

Fertilización inorgánica en el cultivo de arroz

Según Bertsch (2009), el cultivo de arroz requiere 100, 18 y 115 kg·ha⁻¹ de N, P y K respectivamente, para producir 5 t·ha⁻¹ de granos. Por su parte, Arias, Esquivel y Campos (2020), recomiendan fertilizar con 80/140 kg N·ha⁻¹, 40/60 kg P·ha⁻¹ y 40/80 kg K₂O·ha⁻¹. El N es el elemento de mayor importancia y se aplica por medio de fuentes nitrogenadas inorgánicas como urea, nitrato de amonio (NH₄NO₃) y sulfato de amonio ((NH₄)₂SO₄).

Importancia del N

El elemento principal y limitante en el cultivo de arroz suele ser el N, debido a que es esencial para los procesos bioquímicos y fisiológicos de la planta (Mboyerwa et al., 2022). Es necesario para un adecuado desarrollo y producción del grano, así como para garantizar la calidad del cultivo (Shrestha, Chaudhary y Pokhrel, 2018). El N es constituyente de los aminoácidos, ácidos nucleicos y uno de los elementos minerales constituyentes de la clorofila junto con el magnesio, los que influyen directamente en el crecimiento de la planta, tamaño de las hojas, número de macollos, número de espiguillas por panoja, porcentaje de espiguillas llenas y el contenido de proteínas en el grano (Dobermann y Fairhurst, 2005).

El N es requerido por la planta durante todo el proceso de desarrollo, pero la mayor necesidad de este elemento se presenta entre inicio y mediados del macollamiento e inicio de la panoja. Por otra parte, es necesario para retrasar la senescencia de la hoja y mantener la fotosíntesis durante la maduración y el proceso de llenado de granos (Dobermann y Fairhurst, 2005).

Uso de fertilizantes nitrogenados

Los fertilizantes inorgánicos son altamente solubles, principalmente los nitrogenados, lo que contribuye a causar una serie de problemáticas ambientales. Según OCDE y FAO (2020), el uso actual de fertilizantes nitrogenados es muy ineficaz, siendo un claro ejemplo China, el mayor consumidor de fertilizantes de este tipo, donde la mitad del N aplicado se pierde por volatilización y lixiviación y un 5-10% por infiltración y escorrentía. Este uso ineficiente genera contaminación del suelo y del aire al producirse en mayor cantidad los gases de efecto invernadero (GEI).

Se calcula que la agricultura genera entre el 60 y el 70 % de las emisiones de N_2O producidas por la actividad humana, asociadas en gran medida al uso de los fertilizantes (Sánchez, 2019) y se prevé que aumenten en un 50% para 2030 (FAO, 2002). Otras fuentes importantes de emisiones directas de GEI es la descomposición anaeróbica de sustancias orgánicas en los arrozales (10%) (OCDE y FAO, 2020). Según Rosales (2020), el uso de fertilización inorgánica también se realiza de manera incorrecta, es decir, se aplican las fuentes químicas en momentos inadecuados y a una mayor cantidad de la que el cultivo puede absorber. Al aplicarse en momentos o épocas inadecuadas se pueden arrastrar o infiltrar en las aguas subterráneas debido a su alta solubilidad. Este fenómeno ha sido evidenciado en el caso de los nitratos, los cuales llegan a los cuerpos de agua, dándose el proceso de eutrofización que causa un enorme desarrollo de organismos fotosintéticos y desajuste de los ecosistemas acuáticos (FAO, 2002).

Por otro lado, los fertilizantes inorgánicos modifican las propiedades y características fisicoquímicas y biológicas del suelo (Ge, et al., 2008). Según Galindo, et al. (2020), los fertilizantes nitrogenados que no son absorbidos por las plantas son inmovilizados por las arcillas y se van acumulando en el sistema. Esta situación aumenta la acidez y la salinidad edáfica generando un efecto negativo en los micro y macronutrientes esenciales para el desarrollo y productividad vegetal. También se afecta la riqueza y diversidad de las comunidades de microorganismos, principalmente de bacterias

(Ge, et al., 2008; Geisseler y Scow, 2014; Verdenelli, 2018), específicamente debido a la alteración del pH, del potencial osmótico, relación C:N y concentraciones de amonio a niveles inhibitorios para los microorganismos edáficos (Verdenelli, 2018; Wessén, Hallin y Philippot, 2010).

Finalmente, vale la pena indicar que, el uso excesivo de N influye negativamente en la economía del productor, debido a los altos costos de repetidas fertilizaciones (Dobermann y Fairhurst, 2005).

Producción ecológica y sostenible

La Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2019) estima que la población mundial para el año 2050 será de 9700 millones de personas y la demanda por alimentos se incrementará en un 70%, esto sumado a una reducción del área destinada a la producción. Es por eso por lo que son necesarias formas de producción más eficientes pero sostenibles, que permitan mejorar la eficiencia en el uso de fertilizantes químicos o sintéticos, con esto disminuir los efectos sobre los recursos naturales, para alcanzar la seguridad alimentaria (Pérez, Leyva y Gómez, 2018). Para lograr lo anterior, surge la agricultura ecológica, la cual Sánchez y Lorenz (2017), definen como un sistema productivo que no utiliza insumos de síntesis química y toma en cuenta los ciclos naturales que ocurren en el ecosistema. Se basa principalmente en la utilización de la diversidad de especies y en prácticas ancestrales como la asociación, rotación de cultivos, uso de coberturas, incremento de materia orgánica, microorganismos, entre otras.

De acuerdo con Patricia (2021), la agricultura ecológica tiene como objetivo proteger los recursos naturales como el suelo, aire y agua; al mismo tiempo producir cultivos sanos sin residuos de agroquímicos para mejorar la calidad de vida de los productores y consumidores. La agricultura ecológica busca maximizar el uso de insumos propios de la finca o la comunidad, además de favorecer los mercados comunitarios y evitar el desplazamiento y transporte de los alimentos. La Sociedad Española de Agricultura Ecológica/Agroecología [SEAE] (2019) menciona que la agricultura ecológica es un modelo

de producción socialmente justo y económicamente sostenible, ya que las formas de producción ecológicas respetan la diversidad cultural y resguardan la protección del ambiente y la salud del ser humano.

Microorganismos promotores de crecimiento vegetal (PGPR)

Este grupo de microorganismos promueve el crecimiento vegetal debido a su capacidad de interactuar de manera simbiótica o asociativa (mutualismo) con la planta y así estimular su desarrollo y producción, a través de diversos mecanismos bioquímicos y fisiológicos como son la producción de ácidos orgánicos y metabolitos secundarios, así como diferentes fitohormonas (Leal, et al., 2018), solubilización de fosfatos (Mamarandi y Ojeda, 2019), incremento del área o la superficie radical (Alvarez, 2018), inducción de resistencia sistémica a fitopatógenos (Alcedo y Reyes, 2018; Rives, Acebo y Hernández, 2007) o fijación biológica de N (García de Salamone, 2012), entre otros. La mayoría de los PGPR poseen la capacidad de expresar en mayor o menor medida alguno o varios de estos mecanismos en interacción con las plantas lo que depende del género y especie microbiana y vegetal que intervienen en la interacción.

Producción de fitohormonas

Muchos microorganismos del suelo y principalmente los PGPR, tienen la capacidad de producir fitohormonas en concentraciones variables dependiendo de las condiciones del medio (Noor et al., 2023). Estas fitohormonas promueven el desarrollo de las plantas al estimular procesos fisiológicos y metabólicos para favorecer el desarrollo radicular, la elongación aérea, brotación o floración (Okumoto, 2003). Algunas de las fitohormonas que pueden producir las PGPR incluyen ácido indolacético (AIA) del grupo de las auxinas, ácido giberélico (GA_3), citoquininas y ácido abscísico (ABA) o bien, poseen la capacidad de producir la enzima 1-aminociclopropano 1-carboxilato (ACC) desaminasa, que reduce los

niveles de etileno en las raíces o tejidos aéreos con la consecuente reducción de la señal de estrés en la planta (González y Fuentes, 2017).

Solubilización de fosfatos

Dentro de los PGPR, se encuentran los microorganismos solubilizadores de fósforo (MSF). Según Ruiz, et al. (2021), los MSF transforman el fósforo insoluble o fijado en la superficie de las arcillas coloides a fósforo soluble para que pueda ser absorbido por la planta. Esto permite favorecer su desarrollo y producción y disminuir el uso de fuentes de fertilizante inorgánico fosfatado. Vanegas, Flórez y Uribe (2011), mencionan que los MSF se encuentran principalmente en la rizosfera de la planta y el principal mecanismo que poseen se basa en la excreción de protones o ácidos orgánicos que generan una disminución en los niveles de pH cercanos a la raíz, lo que provoca la disposición del elemento mineral para las plantas. En el caso de los ácidos orgánicos, los más significativos son el ácido glucónico o málico, que solubilizan el P y lo hacen disponible para la planta a partir de formas no solubles presentes en la rizosfera.

Control de plagas y enfermedades

De acuerdo con del Carmen, et al. (2017) y González y Fuentes (2017), la capacidad de control biológico es una de las principales características de los PGPR. Dentro de los principales mecanismos para brindar protección a las plantas contra patógenos se encuentran el micoparasitismo, la competencia por nutrientes, resistencia inducida, producción de barreras físicas sobre la raíz como biofilms, la liberación de sideróforos o de enzimas hidrolíticas, como las β -1, 3-gluconasas, quitinasas o compuestos con capacidad antibiótica, entre otras.

Eficiencia en el uso de N

Los PGPR interactúan con la planta y mejoran la eficiencia en la captación y absorción de nutrientes como el N mediante diferentes mecanismos. Entre estos la modificación de la arquitectura del sistema radical y cambios en el funcionamiento de la raíz que favorecen la nutrición mineral (Vacheron et al., 2013; Mantelin & Touraine, 2004). Se ha señalado que *Azospirillum* puede influir en procesos del metabolismo del N, incluyendo la actividad de glutamina sintetasa en raíces, esto se ha reportado principalmente en maíz. La glutamina sintetasa es una enzima central para la incorporación de N en aminoácidos (Domingues Duarte et al., 2020). Para el caso específico de PGPR, se reportan aumentos en la expresión de genes de captación de nitrato y amonio en plantas tratadas con PGPR (Calvo et al., 2019), y evidencia de que algunos genes tipo NRT están implicados en la respuesta de crecimiento inducida por PGPR (Kechid et al., 2013).

Fijación biológica de N atmosférico

Según Galindo, et al. (2020), la fijación biológica de N es la combinación de N molecular o dinitrógeno con oxígeno o hidrógeno para dar óxidos o amonio que se pueden incorporar a la biosfera. La reducción de N a amonio la realizan bacterias que interactúan con la planta como lo son aquellas de *vida libre* o simbióticas fijadoras de N, también llamados microorganismos diazótrofos. Estos microorganismos pueden realizar esta reducción debido a que presentan el complejo enzimático denominado nitrogenasa (codificado por el gen *nifH*) (Tanya y Leiva, 2019).

Según Patricia (2021), una relación simbiótica se inicia cuando existe poca disponibilidad de N en el sustrato, lo que afecta el desarrollo de la planta y la induce a generar un intercambio de señales químicas con el ambiente por la producción de compuestos del tipo flavonoides, que inducen la quimiotaxis de bacterias capaces de reconocer tales compuestos, hacia la raíz. Posterior al contacto con

la planta, se induce la expresión de un conjunto de genes en el microorganismo que terminan por modificar el comportamiento de la planta, en este caso una leguminosa.

Estos genes son los responsables de la producción de los factores *nod* bacterianos que son los encargados de activar la señalización en la raíz colonizada y el inicio de la simbiosis leguminosa-rizobios. En asociaciones mutualistas, este intercambio de señales químicas no se considera un requisito indispensable para la interacción, qué, además, no se considera simbiótica. Los principales géneros de microorganismos con capacidad de llevar adelante el proceso de fijación de N atmosférico y promoción del crecimiento vegetal en el cultivo de arroz de manera asociativa son: *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Clostridium*, *Beijerinckia*, *Azoarcus*, *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Klebsiella* y *Bacillus* (Patricia, 2021; Vanegas, Flórez, Zapata y Uribe, 2011).

El género *Azospirillum*.

El género *Azospirillum* comprende bacilos gruesos de *vida libre*, ligeramente curvos o rectos, y a menudo con extremos puntiagudos, son bacterias Gram negativas. Al cultivarse en medios líquidos o semisólidos presentan movilidad en forma espiral. Desarrollan sólo un flagelo polar pero algunas especies pueden desarrollar muchos flagelos laterales, lo que se conoce como flagelación peritrica. Este género se encuentra principalmente en la rizosfera y en asociación con raíces de poáceas y plantas tuberosas (Hernández, 2003).

Este género bacteriano presenta la capacidad de competir con patógenos en el suelo, producir reguladores del crecimiento del tipo fitohormonas y estimular el crecimiento de las plantas mediante moléculas con actividad biológica, la fijación de N atmosférico o mejorando la capacidad de la planta de absorber nutrientes del suelo o sobrevivir en condiciones adversas, como pueden ser la sequía, salinidad, altas temperaturas o deficiencias nutricionales (Coniglio, et al., 2020). Además, ayudan a mejorar la estructura de los agregados del suelo y disminuir la erosión (Hernández, et al., 2020).

El género *Azotobacter*.

El género *Azotobacter* comprende bacterias de vida libre con forma de bacilos y cocos. Son bacterias Gram negativas y miden aproximadamente de 2 a 4 μm de diámetro. Son aerobios, pero algunos pueden vivir en tensiones bajas de oxígeno y su movilidad se debe principalmente a la presencia de flagelos peritricos. Además, el género posee células en reposo conocidas como quistes (Biochemistry, 2017). Las bacterias de este género además de promover el crecimiento vegetal a través de la fijación biológica de N atmosférico también son capaces de solubilizar fósforo y producir fitohormonas que protegen a la planta ante un ataque de patógenos. La protección puede ser mediante un mecanismo que antagoniza directamente al patógeno, o indirectamente al inducir resistencia sistémica en la planta (Navarrete, León y Arteaga, 2019).

Inoculantes microbianos

Según Okumoto (2003), un inoculante microbiano es un producto que contiene alguna cepa o combinación de diferentes cepas de microorganismos vivos con capacidad de modificar el crecimiento y desarrollo de las plantas o el rendimiento y sanidad en cultivos. Estos productos antes de ser liberados al mercado deben cumplir con una serie de requisitos como son las pruebas de eficacia en el laboratorio, invernadero y a campo, para garantizar su funcionalidad potencial en diferentes sistemas productivos (Vanegas, Flórez y Uribe, 2011). En la Tabla 1 se pueden observar algunos productos comerciales a base de microorganismos fijadores de N disponibles en la actualidad en Costa Rica.

Tabla 1*Inoculantes microbianos disponibles en el mercado de Costa Rica*

Nombre comercial	Fabricante	Grupos de microorganismos formulados	Dosis (l·ha ⁻¹)
Bacthon®	Resusa	<i>Azospirillum brasilense</i> ; <i>Azotobacter chroococcum</i> ; <i>Lactobacillus acidophilus</i> ; <i>Saccharomyces cerevisiae</i> .	1-1.5 l
Nitrobacter®	Bioeco	<i>Azotobacter</i> sp.; <i>Azospirillum</i> sp.; <i>Clostridium</i> sp.	3-4.5 l
Bioprotección AZV-C®	Lab. Dr Obregón	<i>Azotobacter vinelandii</i> ; <i>Azotobacter chroococcum</i> .	1 l
Azofix Plus®	Penergetic	<i>Paenibacillus polymyxa</i>	1-3 l

Nota. Elaboración propia, 2024.

Algunos ejemplos de los beneficios en el uso de microorganismos en la agricultura se describen en los siguientes ensayos: Aguirre (2018) comparó el potencial de 6 rizobacterias promotoras de crecimiento (PGPR) en el cultivo de arroz bajo condiciones de invernadero y a capacidad de campo. Dentro de ellas, *A. brasiliense* fue la más efectiva, produciendo un aumento del crecimiento vegetativo, como peso fresco de la raíz y altura total de las plantas en comparación con el tratamiento testigo sin inoculación. Por su parte, Navarrete et al. (2017) obtuvieron buenos rendimientos en el mismo cultivo utilizando un programa de fertilización química en asociación con *Azospirillum*, donde el rendimiento del

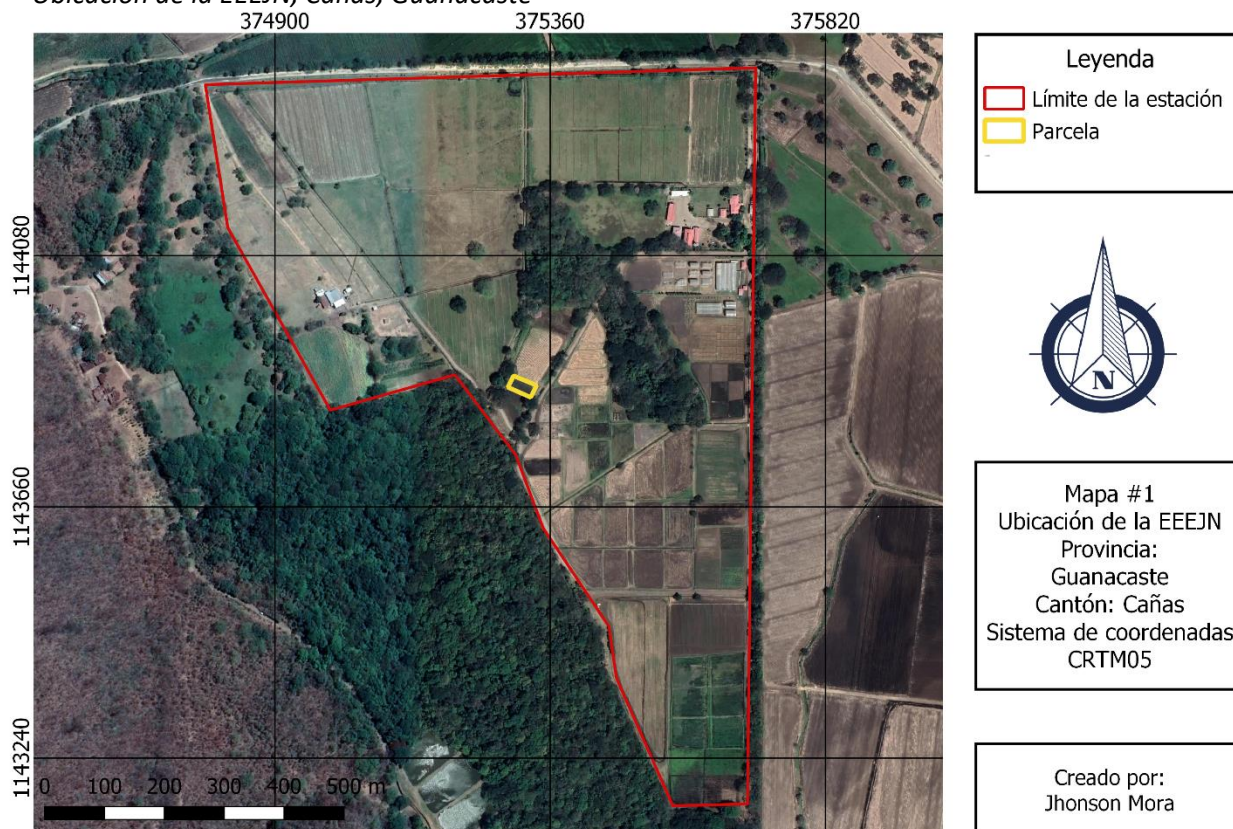
grano aumentó en un 23,44% en comparación con las plantas tratadas solo con fertilización química y sin asociación con este microorganismo.

Asimismo, Silva et al. (2024), inocularon semillas de arroz con *A. brasilense* en condiciones de campo y obtuvieron aumentos en rendimiento de 19% en comparación con los tratamientos que no recibieron la inoculación. Autores como Puente et al. (2013), inocularon con *Azospirillum* en el cultivo de arroz en condiciones de invernadero y obtuvieron un rendimiento 5,84% mayor al tratamiento control sin inocular.

Capítulo III: Metodología

Localización geográfica del estudio

La investigación se llevó a cabo en la Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez (EEEJN), localizada en Cañas, Guanacaste, propiedad del Instituto Nacional de Transferencia Agropecuaria (INTA) (Figura 1). La estación se encuentra a una altitud de 45 msnm, con una precipitación y temperatura promedio anual de 1700 mm y 28 °C, respectivamente. Se localiza bajo las siguientes coordenadas geográficas: 10.343259 de latitud norte y -85.138184 longitud oeste (Ramírez, 2021). El terreno donde se estableció el ensayo se ha clasificado taxonómicamente como *Typic Haplusterts*, con pH promedio de 5,8, acidez intercambiable de 0.11, 25.31 cmol(+)/L de CA, 10.95 cmol(+)/L de Mg y 0.52 cmol(+)/L de K.

Figura 1*Ubicación de la EEEJN, Cañas, Guanacaste*

Nota. Ubicación de la EEEJN en donde se va a realizar la investigación, creación de la figura mediante el software Qgis Desktop 3.2.3. Elaboración propia, 2024.

Caracterización inicial del suelo

Para la caracterización del suelo de la parcela experimental se realizó un muestreo a una profundidad de 20,0 cm en un área de 1000 m² de la EEEJN, en el que se recolectaron 2,0 kg de suelo en diferentes puntos de la parcela. El mismo se secó a temperatura ambiente durante 24 h y se tamizó. Una vez seco y tamizado, se recolectó una sub-muestra de 100 g para realizar el análisis de composición química y recuento de bacterias fijadoras de N. Las sub-muestras se procesaron en el Laboratorio de suelos del Centro de Investigaciones Agronómicas de la UCR (CIA).

Material genético

La línea de arroz evaluada en la presente investigación correspondió a la variedad Lazarroz FL y el material fue donado por la empresa SENUMISA. Es considerada una variedad de macollamiento intermedio, moderadamente tolerante al volcamiento y de buena calidad molinera. Además, alcanza la cosecha a los 115 a 120 días después de la germinación (Vignola, et al., 2018).

Inoculante microbiano

Se utilizó el inoculante microbiano comercial Nitrobacter® de la empresa Bioeco (Costa Rica). La concentración declarada del producto es la siguiente: *Azotobacter* sp. ($1,1 \times 10^7$ UFC·ml⁻¹); *Azospirillum* sp. ($1,0 \times 10^7$ UFC·ml⁻¹) y *Clostridium* sp. ($1,0 \times 10^7$ UFC·ml⁻¹). Previamente a la ejecución del ensayo, se realizó un análisis de calidad en el CIA (UCR), para comprobar las concentraciones antes descritas. Las concentraciones, según el mencionado análisis fueron: *Azotobacter* sp. ($2,6 \times 10^3$ UFC·ml⁻¹); *Azospirillum* sp. ($<1,0 \times 10^3$ UFC·ml⁻¹) y *Clostridium* sp. ($<1,0 \times 10^3$ UFC·ml⁻¹). (Anexo 5). Debido a las bajas concentraciones descritas en el análisis de calidad, las dosis se ajustaron a 5,0 y 6,5 L·ha⁻¹

Descripción de los tratamientos

Se implementaron 10 tratamientos (Tabla 2) con 4 repeticiones por cada uno, para un total de 40 unidades experimentales. Cada unidad experimental correspondió a una microparcela con un área de 6,0 m², con dimensiones de 2 × 3 m y una separación de 2,0 m entre microparcelas. Las plantas del tratamiento testigo absoluto no se fertilizaron ni inocularon; en cambio, las del tratamiento testigo se fertilizaron con N a razón de 200 kg N·ha⁻¹ (100% N). Además, se evaluaron dos tratamientos sin fertilización inorgánica que se inocularon con dosis de 3,0 y 4,5 L·ha⁻¹ de los productos comerciales. En los tratamientos restantes se aplicaron porcentajes reducidos de N, en concentraciones equivalentes al 85% y al 60% del total de N, sin inoculación y en combinación con el inoculante microbiano comercial

Nitrobacter® en dosis de 5,0 y 6,5 L·ha⁻¹, productos que contenían el consorcio de bacterias fijadoras de N (Tabla 2).

Tabla 2.

Descripción de los tratamientos implementados

Tratamiento	No. Tratamiento	Código	No. Repeticiones
Testigo absoluto (Suelo)	T1	TA	4
Testigo (Suelo + Fertilización inorgánica 100%)	T2	T	4
Suelo + Nitrobacter® (5.0 L·ha ⁻¹)	T3	N(3.0)	4
Suelo + Nitrobacter® (6.5 L·ha ⁻¹)	T4	N(4.5)	4
Suelo + Fertilización inorgánica (85%N)	T5	N85%	4
Suelo + Fertilización inorgánica (60%N)	T6	N60%	4
Suelo + Fertilización inorgánica (85%N) + Nitrobacter® (5.0 L·ha ⁻¹)	T7	N(3.0) 85%	4
Suelo + Fertilización inorgánica (60%N) + Nitrobacter® (5.0 L·ha ⁻¹)	T8	N(3.0) 60%	4
Suelo + Fertilización inorgánica (85%N) + Nitrobacter® (6.5 L·ha ⁻¹)	T9	N(4.5) 85%	4
Suelo + Fertilización inorgánica (60%N) + Nitrobacter® (6.5 L·ha ⁻¹)	T10	N(4.5) 60%	4
TOTAL			40

Nota. Elaboración propia, 2025.

Preparación del terreno

Una semana antes de la siembra se mecanizó el suelo mediante una rastra superficial (menor a 20 cm) con el objetivo de eliminar arvenses, terrones y favorecer el desarrollo de las raíces.

Posteriormente, se realizó otro pase de rastra en la dirección contraria, para mejorar la estructura del terreno. Dos días antes de la siembra se utilizó un tractor con rueda fangueadora para eliminar los poros y mejorar la retención de agua.

Además, se realizaron canales de desagüe a una profundidad de 30 cm, con muros de contención a 30 cm de altura, para manejar el agua y liberar excesos según necesidades del cultivo.

Establecimiento de las parcelas

La delimitación de las microparcels se realizó un día previo a la siembra, utilizando estacas de madera, cinta métrica y piola para el marcaje de las dimensiones y posición adecuada según el diseño estadístico.

Siembra

Se realizaron almácigos en bandejas con arena, estos se mantuvieron con aplicaciones constantes de agua en condiciones de invernadero. A los 22 días después de la siembra (dds) se lavaron y se procedió con la siembra por trasplante. Se sembraron dos plantas por punto de siembra a una distancia de 25 cm entre plantas y 30 cm entre hileras. A los 15 días después del trasplante (ddt) se realizó un raleo, dejando únicamente una planta por punto de siembra.

Aplicación de los tratamientos biológicos

Es importante recalcar que se hicieron ajustes en las dosis de aplicación inicial debido a las concentraciones encontradas al realizar el análisis de calidad al producto (Anexo 5). En este caso, se manejaron las dosis de 5,0 y 6,5 L·ha⁻¹. Para ello, se aplicó 3,0 ml de Nitrobacter® en cada una de las

microparcels correspondientes a los tratamientos de $5,0 \text{ L} \cdot \text{ha}^{-1}$; y 3,9 ml en las microparcels correspondientes a los tratamientos de $6,5 \text{ L} \cdot \text{ha}^{-1}$. Esa aplicación se dividió en 3 inoculaciones de 1,0 ml y 1,3 ml respectivamente. La primera al momento del trasplante, la segunda a los 25 ddt y la última a los 45 ddt. Cada aplicación del producto en la microparcels se disolvió en 240 ml de agua destilada y se aplicó vía drench. Los tratamientos a los que no se les aplicó la bacteria también recibieron los 240 ml de agua destilada. La aplicación de los tratamientos se realizó en horas de la mañana.

Fertilización química

Nitrógeno

Se aplicó urea con 46% de N fraccionado en tres aplicaciones. Las plantas del tratamiento T se fertilizaron con $200 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de N correspondiente a 435.0 kg de urea. Los tratamientos restantes se fertilizaron con dosis de 85% del N total ($170 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de N) correspondiente a 370.0 kg de urea y 60% del N total ($120 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de N) correspondiente a 261.0 kg de urea. Estas variantes en el fraccionamiento de la dosis fueron aplicadas en la fase vegetativa del cultivo de la siguiente forma: a los 8 ddt a los 33 ddt y a los 53 ddt. Las cantidades se distribuyeron en un 20%, 40% y un 40% para la primera, segunda y tercera aplicación según tratamiento (Tabla 3).

Tabla 3

Dosificación de urea en los tratamientos a utilizar en la investigación

Tratamiento	Días	Fraccionamiento (%)	Dosis urea [g/microparcels 6 m ²)
T	8	20	52,3
	33	40	104,6
	53	40	104,6
	TOTAL	100	261.5
N 85%	8	20	44,4

N (5.0) 85%	33	40	88,8
N (6.5) 85%	53	40	88.8
TOTAL		100	222,0
N 60%	8	20	31,32
N (5.0) 60%	33	40	62,64
N (6.5) 60%	53	40	62,64
TOTAL		100	156,6

Nota. Elaboración propia, 2025.

Fósforo y potasio

En la fertilización fosfatada, se utilizó una dosis de $29,47 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, equivalente a $67,5 \text{ kg de } \text{P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1}$, empleando como fuente fertilizante el triple superfosfato (TSP) (46%). Se aplicó en los ocho tratamientos 7dds, con una dosis de $14,67 \text{ g} \cdot \text{m}^2$, para un total de $88,02 \text{ g TSP /parcela de } 6 \text{ m}^2$. La totalidad de las parcelas requerirán $2,8 \text{ kg de TSP}$.

Para la fertilización potásica, se aplicó una dosis de $66,9 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, que corresponde a $81 \text{ kg de } \text{K}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1}$, utilizando como fuente potásica el cloruro de potasio (KCl) (60%). Esta fertilización se aplicó a todos los tratamientos en cada una de las unidades experimentales y se fraccionó en dos etapas, 7dds un 28% y entre los 35 y 50 días un 72%. Las dosis de fertilizante por área según el orden de aplicación fueron de $3,75 \text{ g de KCl} \cdot \text{m}^2$ y $9,75 \text{ g KCl} \cdot \text{m}^2$, para una total de $22,5 \text{ g KCl} \cdot \text{parcela } 6 \text{ m}^2$ y $58,5 \text{ g KCl} \cdot \text{parcela de } 6 \text{ m}^2$. En las microparcels se requirió un total de $2,6 \text{ kg KCl}$, distribuido en $0,72 \text{ kg KCl}$ (28%) y $1,87 \text{ kg KCl}$ (72%).

Manejo de malezas, plagas y enfermedades

El manejo de problemas fitosanitarios se realizó de manera convencional. Se aplicaron productos comerciales en los primeros 40 dds, además durante el período de macollamiento y la diferenciación floral. Se utilizó el plan de manejo convencional de la EEEJN con la excepción de que no se realizaron

aplicaciones durante los 5 días previos y posteriores a las inoculaciones. Estos productos se aplicaron de manera foliar mediante bomba de espalda.

Variables de respuesta

Recuento de microorganismos diazotróficos en la rizosfera de la planta

A los 35 ddt y 105 ddt se seleccionó dos muestras de suelo rizosférico por cada microparcela para constituir una muestra compuesta por cada tratamiento. Cada muestra se homogenizó y se envió al CIA, UCR para el recuento de bacterias fijadoras de N totales.

Variables asociadas al crecimiento vegetal, fijación de N atmosférico y eficiencia en el uso de N

Altura total de las plantas

Se seleccionaron 4 plantas al azar de cada microparcela, las que se midieron desde el nivel del suelo hasta el final de la panícula más alta sin considerar las aristas. Se realizó una medición, a los 77 ddt.

Materia seca aérea

Al momento de la cosecha se seleccionaron 2 plantas al azar dentro de la microparcela y se pesó el follaje fresco de cada planta en una balanza, posteriormente se realizó un secado en el horno del Laboratorio de Nutrición Animal de la Escuela de Ciencias Agrarias (ECA) a temperatura de 60 °C durante 48 h. Después del secado, las plantas se pesaron nuevamente para determinar su peso seco (Fonseca, et al., 2020).

Contenido de N foliar

Se seleccionaron las hojas 1,2,3 y 4 de 4 plantas por microparcela para hacer una muestra compuesta por tratamiento. Las muestras se enviaron al CIA, UCR para realizar una cuantificación de N total mediante el método Kjeldahl. Esta evaluación se realizó a los 35 y 84 ddt (Fonseca et al., 2020).

Contenido de clorofila

Se seleccionaron 4 plantas al azar de cada microparcela y se estimó la concentración de clorofila de las hojas 1,2,3 y 4, en el centro de la hoja, evitando contacto con la nervadura, con un medidor de clorofila del tipo SPAD (Konica Minolta, modelo SPAD- 502Plus, Japón). La medición se realizó entre 9:00am y 10:00 am. En total se midió el índice de clorofila de 16 plantas por tratamiento. La evaluación se realizó una semana posterior a la aplicación de urea, correspondiente a 35 y 84 ddt.

Contenido de N suelo

Se realizó un análisis químico completo en cada uno de los tratamientos para evaluar el comportamiento del N posterior a la inoculación de las bacterias fijadoras de N. Se seleccionaron muestras en cada una de las microparcels para obtener una compuesta por tratamiento. El análisis se realizó a los 105 ddt en el CIA, UCR.

Variables para determinar los componentes de rendimiento del cultivo

Esterilidad (%)

Se seleccionó una muestra al azar de 100 granos por cada microparcela con cuatro replicas, se contaron granos llenos y vanos, posteriormente se calculó el porcentaje de esterilidad mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ esterilidad} = \frac{\text{Granos vanos}}{\text{Granos totales}} \times 100$$

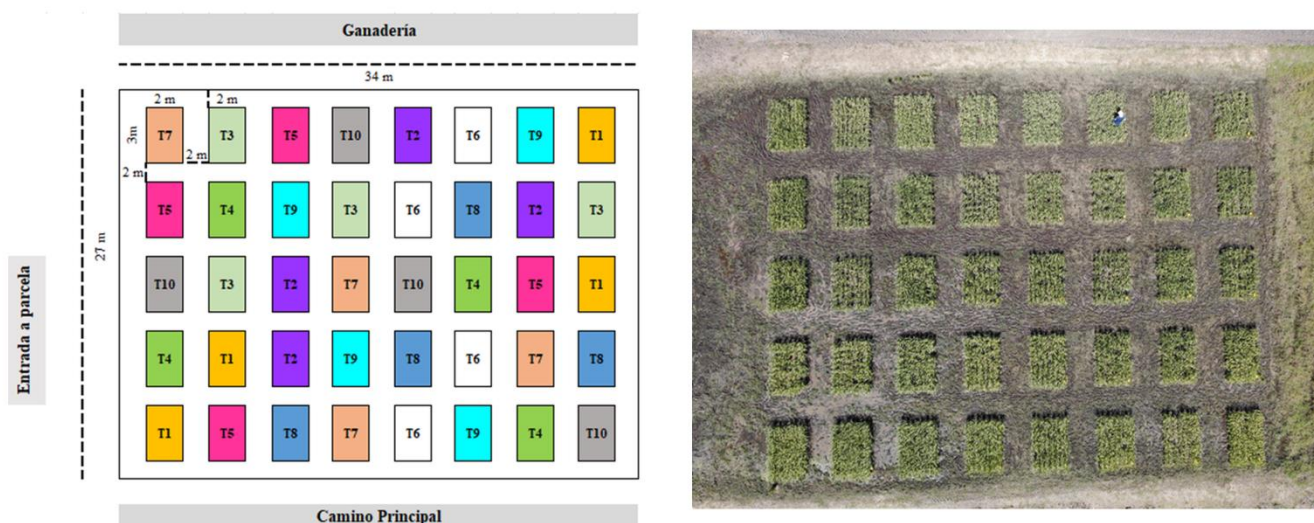
Además, se pesó el total de granos por microparcela para conocer la producción ha^{-1} y se pesaron 100 granos llenos, considerando cuatro réplicas por microparcela.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño bi-factorial, considerando el primer factor como las dosis reducidas de N (60% y 85%) mientras que el segundo factor es la dosis de Nitrobacter® (5,0 y 6,5 L ha^{-1}). Se implementó un diseño completamente al azar (DCA) con 10 tratamientos y 4 repeticiones por tratamiento. La UE correspondió a una microparcela con un área de 6 m^2 , con dimensiones de 2 × 3 m y una distancia de 2 m entre ellas. Se estableció un total de 40 UE, para un área total de 918 m^2 , con 27 m de ancho y 34 m de largo (figura 2).

Figura 2

Croquis de la disposición de las microparcels mediante un diseño completamente al azar (DCA)



Nota. Elaboración propia, 2024.

Análisis estadístico

Para determinar el efecto de los tratamientos sobre la variable de respuesta (índice de clorofila) se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con medidas repetidas en el tiempo bajo la teoría de los modelos lineales mixtos. El modelo lineal para el experimento bi-factorial es:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \gamma_j + \delta_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

$$\text{con: } i = 1 \dots 10, \quad j = 3.5 \dots \text{tiempo}, \quad k = 1 \dots 4$$

Donde

Y_{ijk} : variable de respuesta del i-ésimo tratamiento, j-ésimo tiempo de evaluación y la k-ésima repetición.

μ : media general

α_i : efecto de la i-ésimo tratamiento.

γ_j : efecto de la j-ésimo tiempo de evaluación

δ_{ij} : efecto adicional (interacción) para la combinación de los niveles i del tratamiento y j tiempo de evaluación.

ε_{ijk} : término de error que se distribuye normal independiente con media cero y varianza constante.

Para determinar el efecto de los tratamientos sobre las variables de respuesta de crecimiento y rendimiento (Altura, materia seca follaje, esterilidad, peso 100 granos y rendimiento) se realizó un análisis de varianza (ANOVA). El modelo lineal para el experimento bi-factorial es:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij}$$

$$\text{con: } i = 1 \dots 10, \quad k = 1 \dots 4$$

Donde

Y_{ijk} : variable de respuesta del i-ésimo tratamiento, j-ésimo tiempo de evaluación y la k-ésima repetición.

μ : media general

α_i : efecto de la i-ésimo tratamiento.

ε_{ijk} : término de error que se distribuye normal independiente con media cero y varianza constante.

Se comprobaron los supuestos del ANOVA con gráficos diagnósticos (cuantiles de los términos de error, gráficos de residuos y gráficos de residuos vs. predichos) y se escogió el mejor modelo en función de los criterios de Akaike (AIC) y de información Bayesiano (BIC). En las variables donde existían diferencias estadísticas entre los tratamientos, se realizaron comparaciones de medias por medio de la Prueba de Di Rienzo, Guzmán y Casanoves (DGC) y LSD Fisher permitiendo la formación de grupos excluyentes y no transición entre tratamientos.

Además, para las variables contenido de N foliar y contenido de N suelo se realizó un análisis descriptivo.

Análisis económico parcial de los tratamientos

Se determinaron los costos de la fertilización inorgánica nitrogenada y el uso de Nitrobacter® en cada uno de los tratamientos. Para esto se cuantificaron los costos de los fertilizantes inorgánicos nitrogenados en las dosis de 85 y 60%, así como el uso de Nitrobacter® en las dosis de 5,0 y 6,5l·ha⁻¹. Los resultados fueron extrapolados a una ha para una mejor comparación. La información obtenida permitió escoger el mejor tratamiento comparando los costos de los insumos (urea y Nitrobacter®) y la producción en ton·ha⁻¹. Para realizar lo anterior se consideró la siguiente información.

Costo de la aplicación de urea por hectárea

El costo de la urea se calculó multiplicando la dosis aplicada en cada tratamiento ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) por el precio unitario del fertilizante. Para este análisis se utilizó un valor de ₡18 975 por quintal de 46 kg, equivalente a ₡412 5 por kg de urea. Además, se incorporó el costo de la mano de obra requerida para realizar las tres aplicaciones fraccionadas de fertilizante durante el ciclo del cultivo. El jornal de un trabajador no calificado se estimó en ₡13 000 por día, equivalente a ₡1 625 por hora. El tiempo de aplicación se estimó en 20 segundos por parcela de 6 m² por evento de aplicación; este valor fue extrapolado a una hectárea, obteniéndose un total de 27,78 horas para completar las tres aplicaciones, equivalente a ₡45 138,33 ha^{-1} por concepto de mano de obra. El costo total de urea por tratamiento correspondió a la suma del costo del fertilizante y el costo de aplicación.

Costo de la aplicación Nitrobacter® por hectárea

El costo del inoculante Nitrobacter® se calculó multiplicando la dosis aplicada en cada tratamiento (5,0 o 6,5 L· ha^{-1}) por el precio unitario del producto. Se utilizó un precio de referencia de ₡12 600 por litro. Asimismo, se incluyó el costo de mano de obra asociado a las tres aplicaciones del inoculante durante el ciclo del cultivo. Para ello se utilizó el mismo valor de jornal (₡13 000 día⁻¹) y el mismo tiempo de aplicación estimado para la urea, equivalente a 27,78 horas ha^{-1} y ₡45 138.33 ha^{-1} . El costo total del uso de Nitrobacter® se obtuvo mediante la suma del costo del producto y el costo de aplicación.

Costo total del plan de fertilización nitrogenada

Se estimó el costo total del plan de fertilización nitrogenada para cada tratamiento, integrando el costo de urea, el costo de Nitrobacter® y la mano de obra correspondiente. En los tratamientos que incluyeron tanto urea como inoculante, se sumaron ambos componentes y sus costos de aplicación. Este procedimiento permitió comparar el costo diferencial real de cada estrategia de manejo nitrogenado por hectárea.

Ingreso bruto por hectárea

El ingreso bruto por tratamiento se estimó a partir del rendimiento obtenido ($t \cdot ha^{-1}$) y del precio de venta del arroz. Para ello, se utilizó como referencia un valor de ₡20 360 por saco de 73,6 kg, equivalente a ₡276 630 por tonelada métrica. El ingreso bruto por hectárea se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Ingreso bruto } (\text{₡} \cdot \text{ha}^{-1}) = \text{Rendimiento } (t \cdot \text{ha}^{-1}) \times \text{Precio del arroz } (\text{₡} \cdot t^{-1})$$

Utilidad parcial neta

La utilidad parcial neta de cada tratamiento se obtuvo restando al ingreso bruto el costo total del plan de fertilización nitrogenada. La fórmula utilizada fue la siguiente:

$$\text{Utilidad parcial neta } (\text{₡} \cdot \text{ha}^{-1}) = \text{Ingreso bruto } (\text{₡} \cdot \text{ha}^{-1}) - \text{Costo total del plan de N } (\text{₡} \cdot \text{ha}^{-1})$$

Capítulo IV: Resultados y discusión

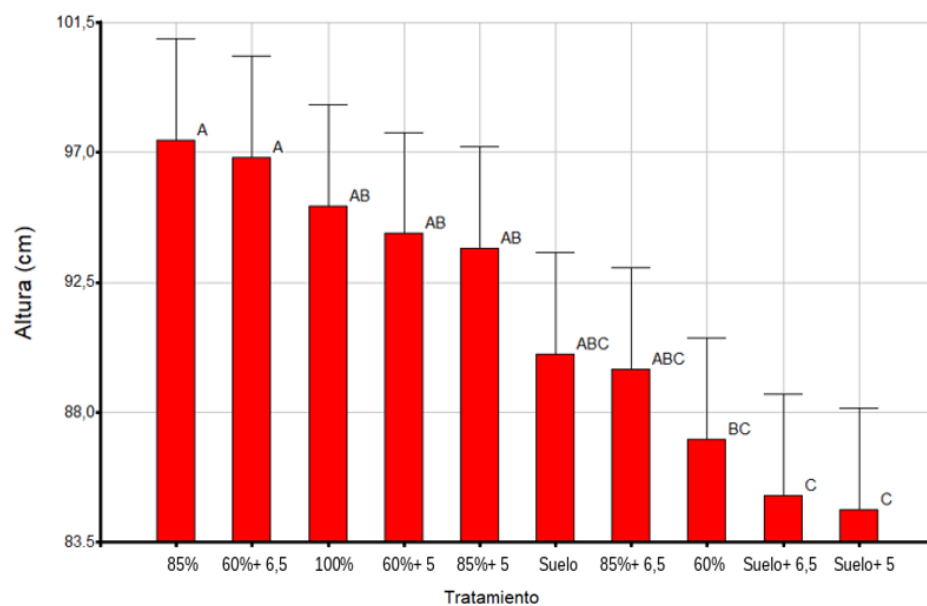
Variables asociadas a crecimiento

Altura

En la Figura 3 se observa la altura de las plantas de arroz a los 77 ddt, las plantas más altas correspondieron a las fertilizadas con el 85% de N, seguido por las plantas fertilizadas con 60% de N + 6,5 L·ha⁻¹ (sin diferencias estadísticamente significativas entre ellos) ($p>0.10$) (Anexo 7). Los tratamientos que tenían plantas con la altura más baja correspondieron a aquellas inoculadas con ambas dosis de Nitrobacter®, y sin fertilización ($p<0.10$) (Anexo 7). Todos los tratamientos se encontraron por debajo de las alturas teóricas de la variedad de 115- 120 cm. Las alturas presentadas en esta investigación no generaron volcamiento de las plantas.

Figura 3

Altura de plantas de arroz a los 77 ddt



Nota. Promedios y desviación estándar de altura de plantas de arroz a los 77 ddt en respuesta a la aplicación de Nitrobacter, fertilización inorgánica y sus correspondientes combinaciones. Letras diferentes en las columnas representan diferencias significativas ($p < 0.10$). Elaboración propia, 2024.

En esta Figura 3 se destaca que las plantas fertilizadas con el 100% de N no fueron las de mayor altura, a pesar de tener el 100% de la necesidad nitrogenada. Es decir, una reducción del 15% en la aplicación del fertilizante nitrogenado, como urea permitió alcanzar alturas mayores en comparación con plantas manejadas al 100% de su necesidad nitrogenada.

También se observa que, una disminución de 40% en la fertilización nitrogenada junto con la inoculación de Nitrobacter® permitió alcanzar alturas mayores en comparación con otros tratamientos. Esta respuesta en altura puede deberse como lo señalan Di Benedetto et al. (2017) a que las bacterias contenidas en el producto se asocian en la rizosfera con la planta interactuando de manera directa con el N y bio-disponiéndolo el elemento para ésta. Al respecto, estos autores señalan que los PGPR estimulan el crecimiento de las plantas por medio de diferentes mecanismos y dentro de ellos algunos relacionados con la biodisposición de nutrientes como, la solubilización de fosfatos, la fijación de N, o la eficiencia en la absorción y uso de elementos minerales por las raíces mediante la liberación de ácido indolacético (AIA), entre otros.

La inoculación con la dosis de $5,0 \text{ l ha}^{-1}$ junto con la fertilización al 60% y 85% permitió mantener alturas similares y sin diferencias estadísticas significativas (Anexo 7), con los mejores tratamientos obtenidos en el ensayo. Lo anterior sugiere un efecto positivo del inoculante cuando se combina con concentraciones menores del fertilizante nitrogenado. Tales resultados son consistentes con reportes para el cultivo de arroz donde la inoculación con bacterias como las del género *Azospirillum*, en esquemas de N reducido puede compensar parcialmente la disminución del fertilizante y favorecer el crecimiento y desarrollo vegetal (Mattos et al., 2022; Yasuda et al., 2022).

En contrapartida, la aplicación del inoculante sin fertilización no aumentó la altura total de las plantas, lo que sugiere que, en ausencia del elemento mineral, no se favorece el efecto del inoculante, que dependería de la presencia del nutriente en el sistema y de algún tipo de activación o bio-disposición para la planta. Considerando otra posible explicación, Santoyo et al. (2021), mencionan que la colonización y establecimiento de las bacterias en la rizósfera depende de compuestos carbonados provenientes de los exudados radicales, los que aumentan con un mayor vigor de la planta.

En arroz, la fuente y concentración de N fertilizante influyen sobre la colonización por *Azospirillum*, debido a cambios en pH y en la exudación de compuestos quimiotácticos como el malato (Naher et al., 2018). Es decir, necesitan un sistema rizosférico activo (C- exudados) que suele ser mayor cuando hay un mínimo de nutrición mineral disponible para la planta. Así, los inoculantes formulados con *Azospirillum* se consideran como una alternativa que mejora la utilización de fertilizantes nitrogenados sin reemplazarlos completamente (Zeffa et al., 2019).

Al respecto, Aminpanah y Firouzi (2019), evaluaron la combinación de *Azospirillum* + *Azotobacter* con 75% y 50% de N en un ensayo de campo en el cultivo de arroz, la inoculación aumentó la altura promedio (control 92,8 cm vs. inoculación 99,4 cm) y, además, 75 kg N·ha⁻¹ mantuvo alturas similares a 100 kg N·ha⁻¹ (100,2 vs 98,2 cm).

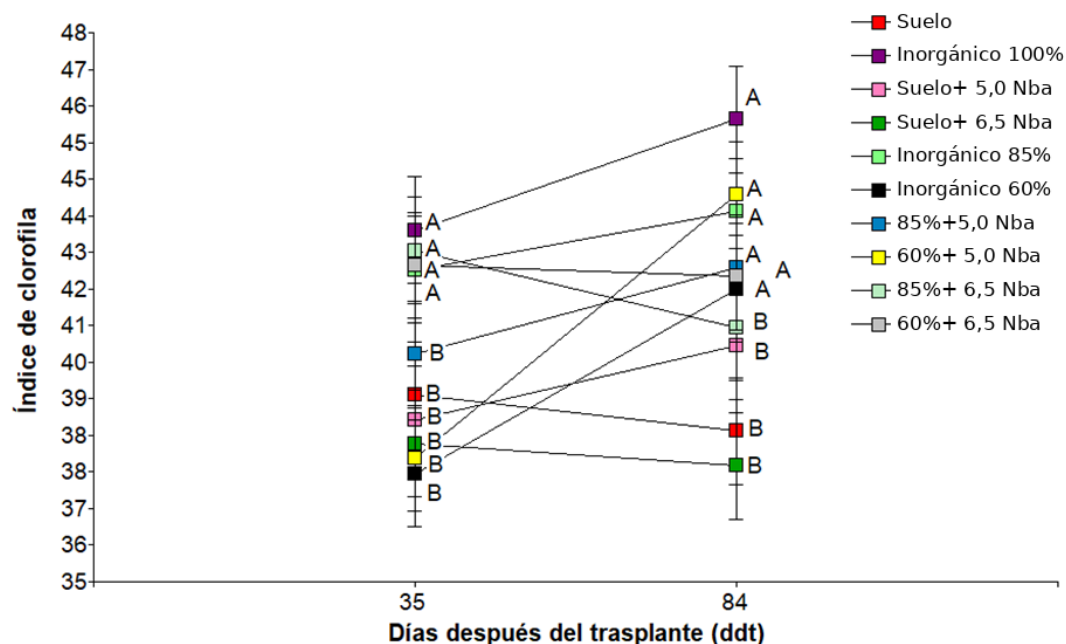
Índice de clorofila

En la Figura 4 se observa el índice de clorofila medido a los 35 y 84 ddt. Los tratamientos con fertilizante inorgánico al 100% y 85% o 60% + el inoculante microbiano presentaron los valores más altos a los 35 ddt y se diferencian estadísticamente del resto de los tratamientos ($p \leq 0.05$). Esto confirma que un aporte reducido de N inorgánico al 60% en combinación con Nitrobacter® complementó la necesidad nitrogenada y favoreció el índice de clorofila en las plantas.

A los 84 ddt se separaron dos grupos de tratamientos, siendo las plantas fertilizadas con 100%, 85% de N y 60% de N + 5,0 l·ha⁻¹ de Nitrobacter® las que presentaron mayor índice de clorofila ($p \leq 0.05$). (Anexo 8).

Figura 4

Índice de clorofila (SPAD) medido a los 35 y 84 ddt



Nota. Promedios en el índice de clorofila medido a los 35 y 84 ddt en respuesta a la aplicación de Nitrobacter, fertilización inorgánica y sus correspondientes combinaciones. Letras diferentes en las columnas representan diferencias significativas ($p \leq 0.05$). Elaboración propia, 2024.

En ambos momentos de las evaluaciones, las plantas con los menores índices de clorofila correspondieron al tratamiento testigo y al suelo + Nitrobacter® en ambas dosis. Esto indica que, a falta de un aporte nitrogenado inorgánico, el índice de clorofila se vio afectado, tal como se explicó previamente. Si bien el inoculante podría fijar N o mejorar la eficiencia en el uso del elemento por la planta (bio-disponerlo), no compensaría en su totalidad en el caso de ausencia de fertilizante.

Según Backer et al. (2018) y Khan y Wani (2021), la eficacia de los inoculantes microbianos depende de la presencia de condiciones favorables en la rizosfera que se potencien con el aporte del fertilizante. Debido a esto, aplicar solo el inoculante, puede no resultar efectivo en casos donde la disponibilidad de nutrientes no es óptima para el cultivo. En el mismo sentido que para las plantas, las bacterias presentes en el inoculante necesitan una fuente adecuada de carbono para desarrollarse y cumplir sus funciones y en condiciones donde la planta se encuentra limitada para el crecimiento debido a que no se realizó la adición de fertilizantes inorgánicos. En tales condiciones no hay disponibilidad de exudados para que los microorganismos se multipliquen y puedan ejercer su efecto positivo sobre las plantas.

A los 35 ddt el tratamiento correspondiente a la aplicación de fertilizante al 60% y 85% en combinación con la dosis de $6,5 \text{ L ha}^{-1}$ de Nitrobacter® fue estadísticamente similar a las plantas fertilizadas al 100% y 85%. Lo anterior evidencia que la incorporación del inoculante en combinación con dosis reducidas de fertilizante permite la compensación de N y mantener el índice de clorofila elevado.

También se observó que en los momentos de evaluación los tratamientos correspondientes al 100% y 85% tenían índices similares. Esto comprueba que la disminución de un 15% del fertilizante nitrogenado no afecta el índice de clorofila a los 35 y 84 ddt. Lo anterior refleja que la planta no estaba limitada por N al 85%, y que con 85% alcanzó el nivel de N foliar suficiente para sostener la formación de clorofila y el funcionamiento fotosintético en la fase de desarrollo vegetativo.

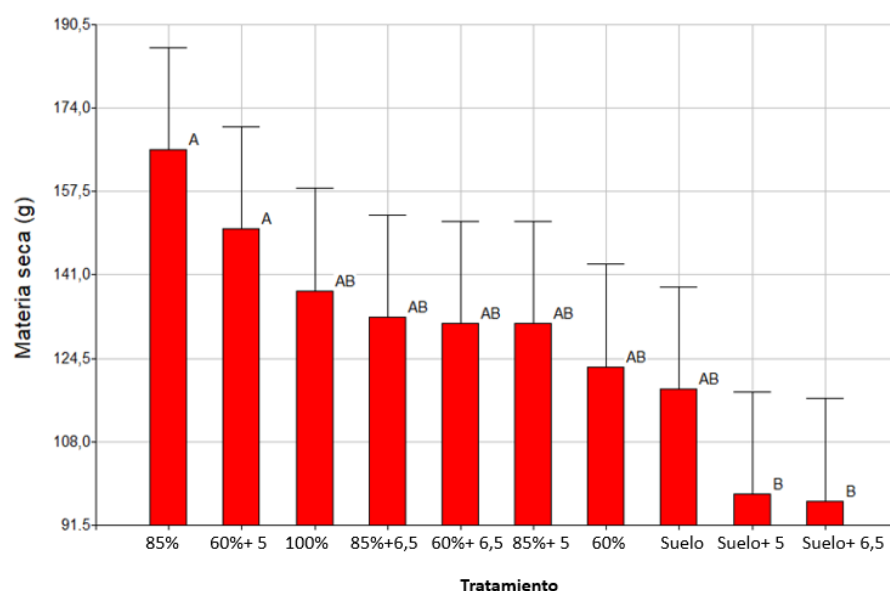
Materia seca

En la Figura 5 se observa la materia seca del follaje de las plantas de arroz al momento de la cosecha. Se aprecian tres grupos de tratamientos, el grupo con mayor materia seca correspondió a las plantas fertilizadas con 85% del total de N, seguido por el tratamiento con 60% de N+ $5,0 \text{ L ha}^{-1}$ del inoculante. Las plantas de los tratamientos fertilizados con el 100% de N y las reducciones de 15 y 40%

con las dos dosis del inoculante se encuentran en el segundo grupo. En el tercer grupo de encuentra el tratamiento testigo y los tratamientos suelo+ inoculación con las dos dosis (sin diferencias estadísticas significativas entre ellos) ($p > 0.05$). (Anexo 9). Las únicas diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) (Anexo 9) se dio entre los tratamientos 85% del total de N y 60% de N+ 5,0 L ha⁻¹ con los tratamientos inoculados sin fertilizar.

Figura 5

Materia seca de plantas de arroz



Nota. Promedios y desviación estándar de materia seca en respuesta a la aplicación de Nitrobacter, fertilización inorgánica y sus correspondientes combinaciones. Letras diferentes en las columnas representan diferencias significativas ($p \leq 0.05$). Elaboración propia, 2024.

El tratamiento correspondiente al 60% de N en combinación con el inoculante en la dosis de 5,0 L ha⁻¹ es comparable con el tratamiento al 85% de N. Esto demuestra que el uso del inoculante compensó parcialmente la reducción del fertilizante inorgánico. Es decir, la inoculación de Nitrobacter® en dosis 5,0 L ha⁻¹ en conjunto con de 60% de N permitió igualar en términos de acumulación de materia seca el uso

de fertilizante inorgánico. Esto implica una reducción de hasta un 25% la aplicación de fuentes inorgánicas como urea en los sistemas productivos.

Estos resultados indican que la reducción en la fertilización nitrogenada combinada con la inoculación de bacterias mantiene niveles de crecimiento similares a tratamientos con mayores cargas de fertilizante inorgánico. Algunos estudios citan efectos similares, por ejemplo, García de Salamone et al. (2012) encontraron que inoculaciones con *Azospirillum* sp. en el cultivo de arroz permitieron reducir hasta en un 40% el uso de fertilizantes a base de N sin afectar la productividad. Asimismo, investigaciones realizadas por Vázquez et al. (2020) informan que la combinación entre *Azotobacter* y fertilización sintética reducida puede mejorar la eficiencia del uso de N y promover el desarrollo del cultivo.

El efecto conjunto de las bacterias contenidas en Nitrobacter® (*Azospirillum* sp., *Azotobacter* sp. y *Clostridium* sp.) podría mejorar la disponibilidad de nutrientes y la estimulación hormonal del cultivo, promoviendo el crecimiento vegetativo incluso con una aplicación reducida de fertilizante inorgánico nitrogenado (Bashan y de-Bashan, 2010).

Lo anterior sugiere que el uso al 100% del fertilizante sintético nitrogenado no representa un beneficio agronómico adicional en parámetros de crecimiento. Existe la necesidad de optimizar el manejo agronómico y nutricional del cultivo con un 15% menos del insumo inorgánico.

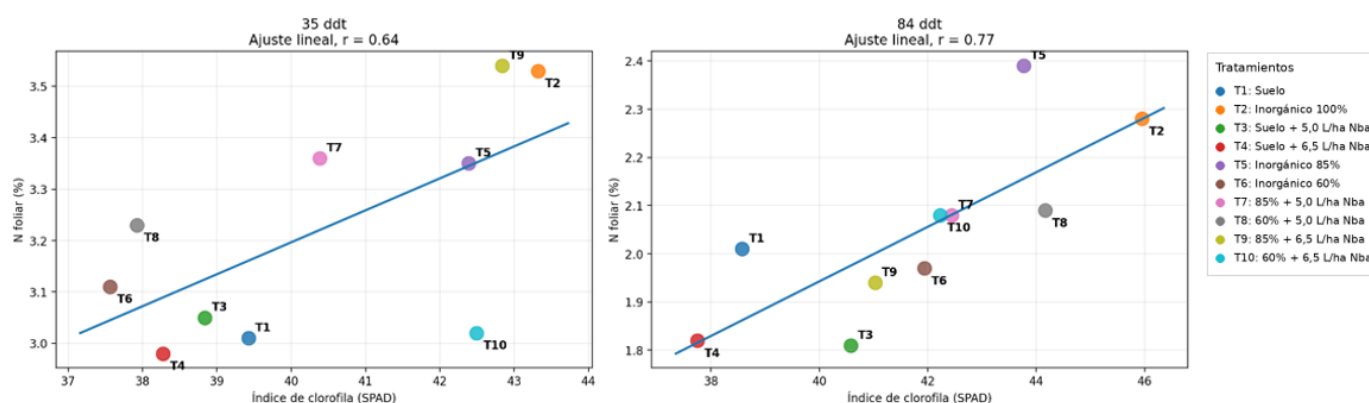
Autores como, Ladha et al. (2005), mencionan que una dosis excesiva de N no necesariamente se traduce en un incremento de la productividad o desarrollo. Incluso puede generar pérdidas por lixiviación y volatilización, provocando contaminación ambiental. Peng et al. (2006) indican que, en sistemas arroceros asiáticos las dosis de fertilización optimizadas (por debajo del 100%) mejoran la eficiencia en la absorción del N. Esto sucede especialmente cuando se acompañan de prácticas de manejo adecuadas o bioestimulantes.

Correlación entre índice de clorofila y N foliar

En las Figura 6 se aprecia una asociación positiva entre el índice de clorofila medido con SPAD y el contenido de N foliar (%) determinado por análisis químico a los 35 y 84 ddt.

Figura 6

Correlación entre N foliar (%) e índice de clorofila a los 35 y 84 ddt



Nota. Correlación entre N foliar e índice de clorofila a los 35 y 84 ddt en respuesta a la aplicación de Nitrobacter, fertilización inorgánica y sus correspondientes combinaciones. Elaboración propia, 2025.

Esta relación fue la esperada desde el punto de vista fisiológico, porque el N foliar está estrechamente ligado a la capacidad fotosintética de la planta y una fracción importante del N en la hoja se asigna a proteínas del aparato fotosintético y del metabolismo del carbono, lo que se refleja en hojas con mayor contenido de clorofila cuando el N es adecuado (Dong et al., 2022).

Además, el SPAD es un método muy usado en arroz para monitorear el contenido de N en campo y mejorar la eficiencia del fertilizante, debido a que se relaciona con el verdor y clorofila de la hoja (Wu et al, 2024).

Al comparar los momentos de evaluación, la relación se fortalece a 84 ddt ($r=0,77$; $p=0.009$) respecto a 35 ddt ($r=0,64$; $p=0.044$) (Anexo 10). A los 35 ddt esa correlación moderada está influida en gran medida por un valor atípico (un tratamiento con SPAD alto, pero N% relativamente bajo). Sin embargo, en ambos momentos de evaluación la correlación se considera alta.

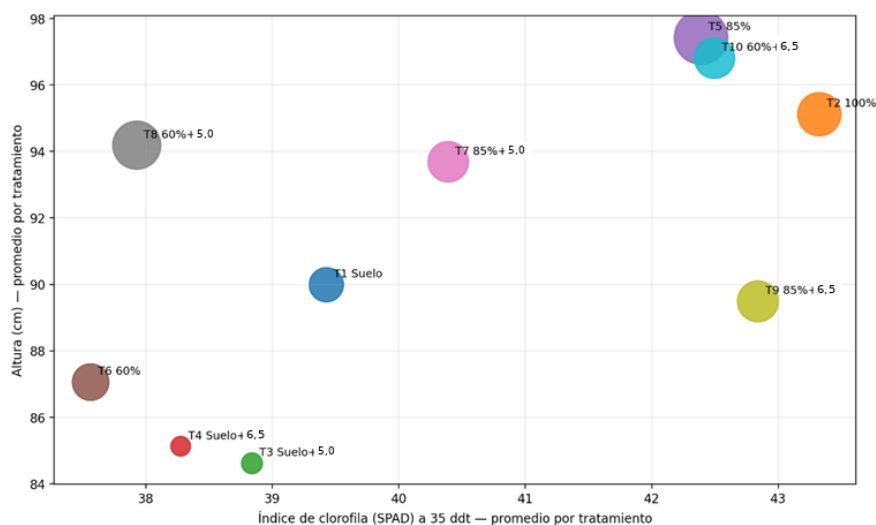
Valores atípicos son comunes cuando se compara índice de clorofila con el SPAD contra N foliar expresado en % (base por masa), porque el SPAD puede verse afectado por características de la hoja como espesor y peso. En arroz se ha documentado que el espesor de hoja y momento de medición puede influir en la lectura SPAD y en su relación con N expresado por peso seco (Peng et al., 1993; Li et al., 2011).

Según los datos anteriores y la alta correlación entre variables es de vital importancia el uso de SPAD para cuantificar N foliar debido a que es un método no destructivo, rápido y con alta confiabilidad. Sin embargo, es importante tomar en cuenta los momentos de medición, las características de la hoja y el sitio de muestreo. La metodología utilizada en este ensayo permite validar el uso del SPAD como indicador del contenido de N foliar.

En la Figura 7 se aprecian las variables de altura, materia seca y su relación con el índice de clorofila a los 35 ddt, los resultados indican que la incorporación del inoculante microbiano en combinación con dosis reducidas de fertilizante nitrogenado permitió mantener respuestas agronómicas comparables a las obtenidas con fertilización inorgánica al 100% y 85% de N. De manera general, los tratamientos inoculados mostraron valores de índice de clorofila relativamente elevados (comparándose con los inorgánicos 85% y 100%) en las dos evaluaciones realizadas, lo que sugiere un mejor estado nitrogenado foliar durante la etapa vegetativa del cultivo.

Figura 7

Altura vs Índice de clorofila (SPAD, 35ddt), burbuja= Materia seca



Nota. Relación entre altura, índice de clorofila a los 35 ddt y materia seca en respuesta a la aplicación de Nitrobacter, fertilización inorgánica y sus correspondientes combinaciones. Elaboración propia, 2025.

También, en la Figura 7 se observa que los tratamientos con mayor índice de clorofila tienen valores más altos de materia seca. Según Dong et al. (2022), la base fisiológica es que el N foliar se relaciona con la capacidad fotosintética y la producción de biomasa, por eso, cuando la hoja tiene N suficiente, mantiene clorofila y funcionamiento fotosintético que se ve reflejado en desarrollo de la planta. Esto también se observa en la Figura 6, en donde existe una relación directa entre contenido de N foliar y el índice de clorofila a los 35 y 84 ddt.

En este contexto y bajo los resultados de que existió un índice de clorofila y contenido de N elevado en los tratamientos 60% + 6,5 l·ha⁻¹, 85% y 85% + 6,5 l·ha⁻¹, se determinó que la promoción de crecimiento de la planta al asociarse con las bacterias del inoculante se debió a mecanismos de acción asociados a este elemento mineral, como aquellos relacionados con una mayor eficiencia en la absorción y uso del N disponible o la captación desde la atmósfera por medio de la fijación biológica de N atmosférico, lo que pierde un poco de soporte cuando se considera que los tratamientos inoculados

pero no fertilizados no fueron los que presentaron los efectos positivos más significativos o no tuvieron una diferencia marcada con respecto al testigo (sin inoculación).

Así, bajo la evidencia de este ensayo no es posible afirmar cuál de los dos mecanismos generó la incorporación de N por la planta, sin embargo, de acuerdo con la literatura, el mecanismo utilizado por bacterias como *Azotobacter* o *Azospirillum* se asociaría con aumentar la eficiencia en la absorción y uso del N disponible - aplicado como fertilizante, más que con la fijación biológica de este elemento desde la atmósfera.

Autores como Steenhoudt y Vanderleyden (2000), mencionan que, la fijación biológica suele ser discutida, por lo que se enfatizan mecanismos como cambios en la arquitectura de la raíz y mayor absorción de agua y nutrientes. En contrapartida, algunos estudios reportan sinergia con niveles reducidos de N y posibilidad de reemplazo parcial del fertilizante mediante inoculación (Barbosa et al., 2022).

La fijación biológica de N atmosférico es energéticamente costosa porque convertir N_2 atmosférico en amoníaco (NH_3) mediante la nitrogenasa exige un gran gasto de energía metabólica. Se menciona que, en condiciones ideales, el proceso requiere al menos 16 moléculas de ATP (y varios electrones) por cada N_2 reducido. Además, parte del flujo electrónico se pierde en la formación de H_2 como subproducto, lo que incrementa el costo neto del proceso (Cheng et al., 2026 y Xuan et al., 2023).

Por esa razón, los microorganismos regulan estrictamente la nitrogenasa cuando en el ambiente hay suficiente N ya fijado (NH_4^+/NO_3^- o N disponible por fertilización). Estos PGPR suelen reprimir la expresión de genes *nif* y/o reducir la actividad fijadora, ya que resulta fisiológicamente más eficiente utilizar ese N disponible que invertir energía en fijarlo desde el aire (Zeng et al., 2024).

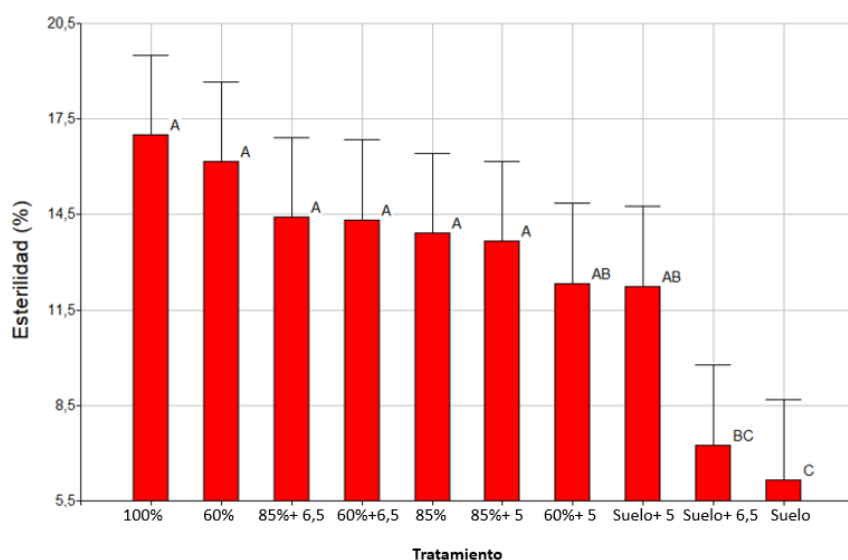
Variables asociadas a rendimiento

Esterilidad

En la Figura 8 se presenta el porcentaje de esterilidad observado en las espigas por tratamiento al final del ciclo productivo, existen diferencias estadísticas ($p \leq 0.10$) (Anexo 11) entre dos grupos de tratamientos. Los tratamientos que incluyen fertilizante inorgánico (100%, 85% y 60%) y sus combinaciones con el inoculante Nitrobacter® (5,0 y 6,5 l ha⁻¹) presentaron los porcentajes más altos de esterilidad (grupo A), sin diferencias significativas entre ellos (Anexo 11). En cambio, el tratamiento sin fertilizar ni inocular (suelo), y los inoculados en las dos dosis sin fertilizar mostraron los valores más bajos de esterilidad (grupo B).

Figura 8

Esterilidad de granos de arroz



Nota. Promedios y desviación estándar de esterilidad de los granos (medida en una muestra de 100 granos) en respuesta a la aplicación de Nitrobacter, fertilización inorgánica y sus correspondientes combinaciones. Letras diferentes en las columnas representan diferencias significativas ($p \leq 0.10$).

Elaboración propia, 2024.

Este resultado indica que la inoculación con PGPR en combinación con la fertilización inorgánica no tuvo efecto en la reducción del llenado del grano bajo el escenario de esta investigación. Por el contrario, los tratamientos sin fertilizar y con los rendimientos más bajos presentaron menor esterilidad, sin diferencias con respecto al testigo absoluto (suelo).

Este resultado se relaciona con la menor productividad (Figura 10) en estos tratamientos (Suelo, Suelo+ inoculante) y mayor peso de 100 granos (Figura 9). Según Liberatore et al. (2025), existe una compensación reproductiva bajo estrés para aumentar la supervivencia, es decir, en condiciones limitadas de nutrientes la planta produce menos estructuras reproductivas pero las pocas que desarrolla tienen mayor funcionalidad y con menor esterilidad. Se considera un mecanismo de supervivencia adaptativo. Por otra parte, los tratamientos con mayores aportes nutricionales favorecieron un crecimiento más vigoroso (Altura, materia seca, índice de clorofila), pero también mayor esterilidad debido posiblemente a desbalance en el reparto de asimilados.

Estos resultados coinciden con Zhong et al. (2025), en un estudio en arroz bajo estrés lumínico, donde niveles medios de N mejoraron la elongación del tubo polínico y la fertilidad de espiguillas, pero niveles elevados ($260 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$) provocaron disminución en la fertilidad y aumento de esterilidad debido a un potencial desbalance fuente- destino inducido por el exceso nutricional.

Otra de las principales hipótesis corresponde a que, teóricamente la variedad Lazarroz FL ha reportado hasta $8\text{-}9 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$ bajo manejos adecuados y sin factores ambientales de estrés (CONARROZ, 2023). En esta investigación se reportaron algunos niveles de estrés ocasionados principalmente por presión de arvenses en la etapa de llenado del grano. Los promedios más altos obtenidos fueron de $4 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$, siendo 50% más baja que el promedio teórico de la variedad. Debido a esto, la alta esterilidad o

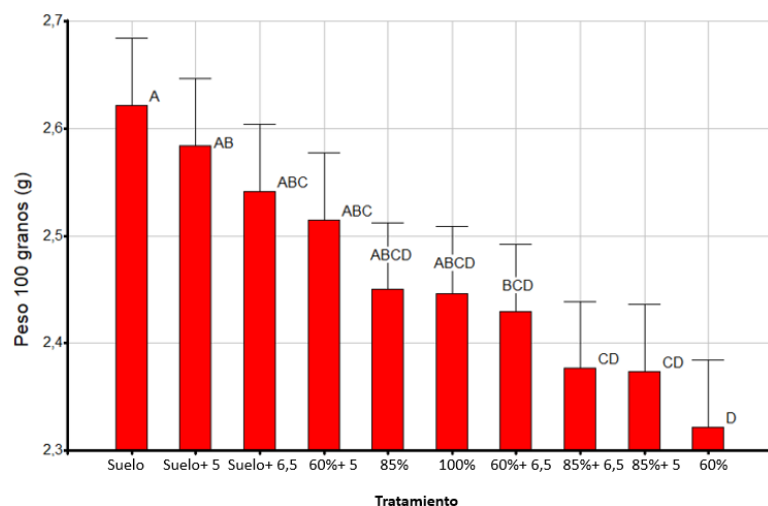
granos vanos en los tratamientos con mayor rendimiento se generó producto de un estrés en la planta y no a una deficiente traslocación de asimilados.

Peso de 100 granos de arroz

En la Figura 9 se presenta el peso de 100 granos obtenido al final del ciclo productivo según los diferentes tratamientos. Se observan diferencias estadísticas significativas entre grupos de tratamientos ($p \leq 0.05$) (Anexo 12). El tratamiento sin fertilizar ni inocular (suelo) presentó el mayor peso de 100 granos, seguido por los tratamientos Suelo + 5,0 L·ha⁻¹ y Suelo + 6,5 L·ha⁻¹ de Nitrobacter®, sin diferencias significativas entre ellos (Anexo 12). En contraste, los tratamientos que incluyeron las dosis de fertilización inorgánica (100%, 85% y 60%) y sus combinaciones con el inoculante microbiano presentaron los pesos de grano más bajos.

Figura 9

Peso de 100 granos de arroz (g)



Nota. Promedios y desviación estándar de peso de 100 granos en respuesta a la aplicación de Nitrobacter, fertilización inorgánica y sus correspondientes combinaciones. Letras diferentes en las columnas representan diferencias significativas ($p \leq 0.05$). Elaboración propia, 2024.

Los resultados obtenidos sugieren que, la aplicación de la fuente de N inorgánica disminuyó el peso de los granos. De acuerdo con Chen et al. (2022), es posible que exista una competencia entre espigas superiores e inferiores, es decir, en los tratamientos con mayor rendimiento existe mayor producción de espigas, pero las inferiores reciben menos recursos o la traslocación es ineficiente. El principal mecanismo es la reducción de la biosíntesis de citoquininas y auxinas en las espigas inferiores. Debido a lo anterior, se observa que los tratamientos que presentaron mayor rendimiento (Figura 10) tuvieron un menor peso de 100 granos o llenado más ineficiente.

Estos hallazgos también concuerdan con los obtenidos por Zhao et al. (2022), ellos indican que la aplicación excesiva de N en arroz disminuye la velocidad de llenado de espigas inferiores en un rango de 12.7 % y 25.8 %, esto resulta en una disminución promedio del peso del grano. Según estos mismos autores el llenado del grano depende de la adecuada translocación de carbohidratos y N desde el tallo y las hojas en la etapa reproductiva. Un exceso de N puede generar desequilibrios, disminuyendo la eficiencia de esa translocación, especialmente es espigas inferiores o secundarias.

Al respecto, según Apuy y Wong (2022), el peso promedio de 100 granos arroz de la variedad Lazarroz FL es de 2,77 gramos y este puede verse afectado ligeramente por la fertilización y condiciones del cultivo.

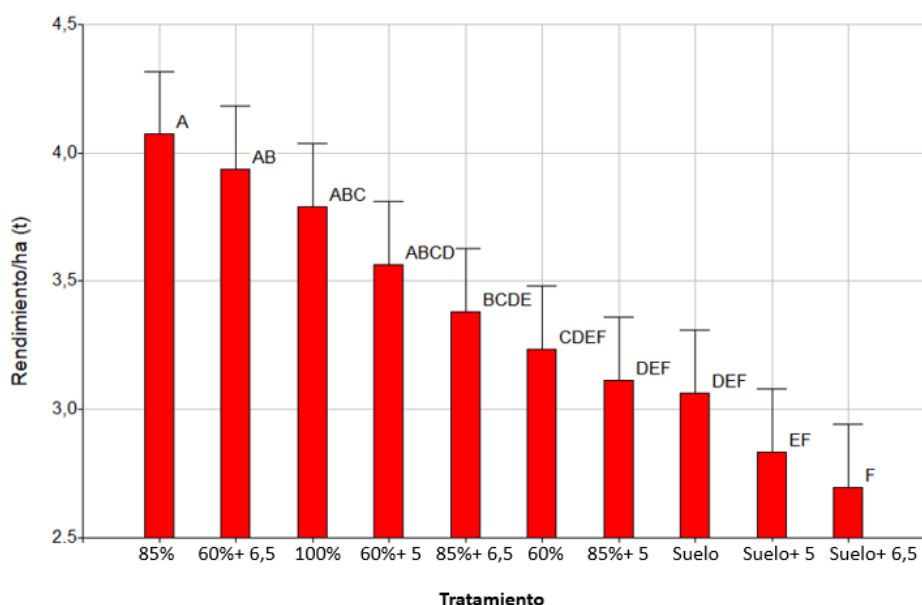
Rendimiento

En la Figura 10 se presenta el rendimiento de grano por hectárea (t/ha) obtenido en cada tratamiento al final del ciclo productivo. Se aprecia una clara separación estadística entre tratamientos, con diferencias significativas ($p \leq 0.05$) (Anexo 13). Los tratamientos con fertilización inorgánica al 85% y 100%, así como el tratamiento con 60% de fertilizante combinado con 6,5 y 5,0 L·ha⁻¹ del inoculante Nitrobacter®, presentaron los mayores rendimientos, con valores superiores a 3,5 t/ha. En contraste, los tratamientos sin fertilizar (suelo), con o sin inoculación, presentaron los rendimientos más bajos con valores inferiores a 3,1 t/ha.

Además, los tratamientos con 85% de N e inoculados con las dos dosis de Nitrobacter® presentaron rendimientos menores en comparación con el tratamiento fertilizado con el 85% de N sin inoculación, lo que sugiere que, la adición del inoculante no mejoró el rendimiento al combinarlo con la dosis de 85% de N.

Figura 10

Rendimiento de arroz (t/ha)



Nota. Promedios y desviación estándar de rendimiento en respuesta a la aplicación de Nitrobacter, fertilización inorgánica y sus correspondientes combinaciones. Letras diferentes en las columnas representan diferencias significativas ($p \leq 0.05$). Elaboración propia, 2024.

En los resultados se demuestra que una reducción del 40% en la aplicación de N, en conjunto con las dos dosis del inoculante microbiano, permitió igualar el rendimiento (de manera estadística) con el tratamiento con 100% de fertilización inorgánica, además, de superarlo en un 4,22%. De acuerdo con Perrig et al. (2007) y Timofeeva et al. (2023), esto se explica por la acción de los microorganismos presentes en el inoculante, que pueden fijar N atmosférico, modular el metabolismo hormonal, producir

y secretar compuestos asociados a la captación de micronutrientes como los sideróforos y/o mejorar la bio-disposición de nutrientes para la planta. Esto permite promover mayor absorción y aprovechamiento de los recursos del suelo.

Además, Cassán y Díaz Zorita (2016) y Cassán et al (2020), mencionan que los PGPR como alguno de los presentes en inoculantes como Nitrobacter® producen fitohormonas como auxinas, giberelinas y citoquininas que contribuyen al cambio en la arquitectura de la raíz mejorando la absorción de agua y nutrientes desde el suelo. Los autores mencionan que la combinación de mecanismos o Mecanismos Múltiples son los que promueven el crecimiento y productividad vegetal.

Según los resultados obtenidos en este trabajo, la aplicación del 60% de N permitió obtener un efecto positivo de las bacterias presentes en el inoculante, que resultó contrario al efecto obtenido por combinarlo con un 85% de N. Según Kang et al. (2022), una reducción en la aplicación de N genera un estrés nutricional en la planta que la hace receptiva a la interacción con microorganismos presentes en el suelo. Los autores mencionan que la molécula señalizadora que domina la colonización radicular corresponde al óxido nítrico (NO), producido a través del proceso de desnitrificación en la fertilización con N. Lo anterior se explica por el posible efecto de “reclutamiento de bacterias inoculadas” que permitirían, aumentar la absorción y/o eficiencia en el uso del fertilizante o nutrientes disponibles, fijar N atmosférico, solubilizar fósforo y estimular el desarrollo radicular, lo que complementaría la deficiencia del elemento en el sistema (de Andrade et al., 2023).

Los resultados de la presente investigación concuerdan con los de Kang et al. (2022), al determinar que un aporte moderado de N promueve la colonización de la rizosfera, mientras que un aporte excesivo inhibe la actividad benéfica de las bacterias sobre las plantas (como posible consecuencia de una inhibición de la colonización).

En el Anexo 6 se observa el comportamiento rizosférico de las bacterias a los 35 y 105 ddt en los diferentes tratamientos. No existieron diferencias marcadas en la sobrevivencia de las bacterias en estos dos momentos de evaluación por lo que se podría considerar que el establecimiento en el sistema fue deficiente y el efecto de promoción no fue dependiente de las bacterias aportadas por el producto; sin embargo, en la Figura 4 y 6 y los altos valores en el índice de clorofila y N foliar del tratamiento 60% N+ 4,5 L·ha⁻¹ de Nitrobacter® en comparación con los tratamientos inorgánicos (100% y 85%) son evidencia de la incorporación de N y el efecto promotor de las bacterias aportadas por el producto .

También, es posible que la dinámica en el suelo determinara que las bacterias fueran capaces de sobrevivir en el suelo por periodos cortos y que precisamente en estos momentos de evaluación no estuvieran presentes por su capacidad de movilizarse dentro de las plantas. De acuerdo con estos resultados, en próximos ensayos, se recomienda aumentar la cantidad de análisis de viabilidad (UFC), tanto en el suelo, como dentro de las plantas (endofitismo), a lo largo del ciclo de producción, para conocer de manera más clara el comportamiento de las bacterias en el sistema. Este abordaje debería complementarse de manera molecular con el desarrollo de metodologías como la de PCR en tiempo real.

Es posible que la ausencia de diferencias claras en UFC en suelo rizosférico durante los momentos de evaluación no refleje necesariamente ausencia del inoculante sino la dinámica espacio-tiempo de las poblaciones y su movimiento en el sistema. Se ha reportado colonización endófitica de cepas de *Azotobacter* en raíces de arroz (Banik et al., 2019) y *Azospirillum* endófito asociado a tejidos internos de arroz (Kaneko et al., 2010). También existe colonización endofítica que está modulada por manejo nutricional (fuente y concentración de N) (Naher et al., 2018), y la forma de inoculación que puede modificar los patrones de establecimiento, persistencia y detección de los PGPR (Takahashi et al., 2024).

A modo de resumen, podemos mencionar que nuestros resultados nos indican que el tratamiento con 60% de fertilización nitrogenada en combinación con ambas dosis de Nitrobacter® mostró un comportamiento favorable en variables de crecimiento y rendimiento, alcanzando valores estadísticamente similares al tratamiento con 100% de N (Ver anexos del 7 al 13). En contraste, el tratamiento con 60% de N sin inocular presentó rendimientos menores, esto indica una deficiencia nutricional no compensada.

Por otro lado, los tratamientos con 85% de N en combinación con Nitrobacter® mostraron un rendimiento más bajo en comparación con solo 85% de fertilizante inorgánico, esto sugiere que la aplicación del bioinoculante no generó un efecto positivo adicional al aumentar la fertilización.

Estos resultados infieren que las bacterias presentes en Nitrobacter® se establecieron y expresaron su funcionalidad biológica al aplicarse junto con una dosis reducida de N (60%), debido a un entorno favorable para la interacción con la planta. En condiciones de mayor fertilización (85%), es posible que el exceso de N haya reducido la necesidad de la planta de establecer asociaciones microbianas o que se haya generado un ambiente en el suelo menos propicio para la colonización de la rizosfera.

Según Wang et al. (2023), y Tao et al. (2024), el ambiente edáfico resultante de altas dosis de fertilización nitrogenada puede ser adverso para la supervivencia y funcionalidad de los microorganismos benéficos. Se ha demostrado que el exceso de N provoca acidificación del suelo, incremento de la salinidad, y reducción de la relación C:N, lo cual limita la colonización de la rizosfera por PGPR.

Según lo evaluado y considerando los valores altos en el índice de clorofila y N foliar (Figura 4 y 6) a los 35 y 84 ddt en el tratamiento con 60% de N+ 6,5 L·ha⁻¹ de Nitrobacter® y su relación con el rendimiento, se infiere que una mayor cantidad de N en el tejido foliar permite aumentar el

rendimiento. Existe una mejora en la eficiencia de uso del N aplicado, asociada a una mayor absorción y aprovechamiento del fertilizante, promovida por la dinámica de las bacterias inoculadas.

Algunos mecanismos que explican la eficiencia en el uso de N se deben principalmente a cambios en la arquitectura radicular que favorecen raíces laterales y densidad de pelos radicales. (Alvarez, 2018). Aunque en este ensayo no se evaluó directamente la arquitectura radicular, variables relacionadas como la altura (Figura 3) y la materia seca (Figura 5), mostraron un comportamiento favorable en el tratamiento con reducción del 40% de N e inoculación con 6,5 L·ha⁻¹ de Nitrobacter®.

Otros mecanismos relacionados con la eficiencia en la absorción y uso de N promovidos por PGPR incluyen la regulación de transportadores (nitrato) y la modulación de la captación de NO₃⁻, lo cual contribuye a mejorar el aprovechamiento del N disponible y/o aplicado (Pii et al., 2019; Fan et al., 2017). Asimismo, favorece la asimilación interna del N mediante enzimas clave como el nitrato reductasa (NR) y el ciclo GS/GOGAT (Glutamina sintetasa/Glutamato sintetasa) (incorporación de amonio (NH₄⁺) en compuestos orgánicos (aminoácidos). Domingues et al. (2020) mencionan que *Azospirillum* puede incrementar la actividad de glutamina sintetasa en raíces, enzima central para la incorporación del N en aminoácidos, lo que respalda su papel potencial en una mayor eficiencia del uso del N.

La baja respuesta en el rendimiento al combinar 85% de N (urea) con el inoculante podría estar asociada a condiciones rizosféricas menos favorables para la colonización y expresión del PGPR. En arroz se ha reportado que concentraciones elevadas de N en forma amoniacal reducen la exudación de ácido málico y la quimiotaxis de *Azospirillum*, además de inducir acidificación del medio, esto limita la colonización, por ello, el efecto del inoculante puede disminuir a niveles altos de N (Naher et al., 2018).

Resultados similares a favor del uso de PGPR en variables de crecimiento y rendimiento son mencionados por, Aguirre (2018), el cual comparó el potencial de 6 rizobacterias en el cultivo de arroz bajo condiciones de invernadero y a capacidad de campo. La bacteria *A. brasiliense* fue la más efectiva,

ya que aumentó en 4 g el peso fresco de la raíz en comparación con el tratamiento sin inoculación.

Además, aumentó la altura de las plantas en 4,5 cm en comparación con el mismo tratamiento testigo.

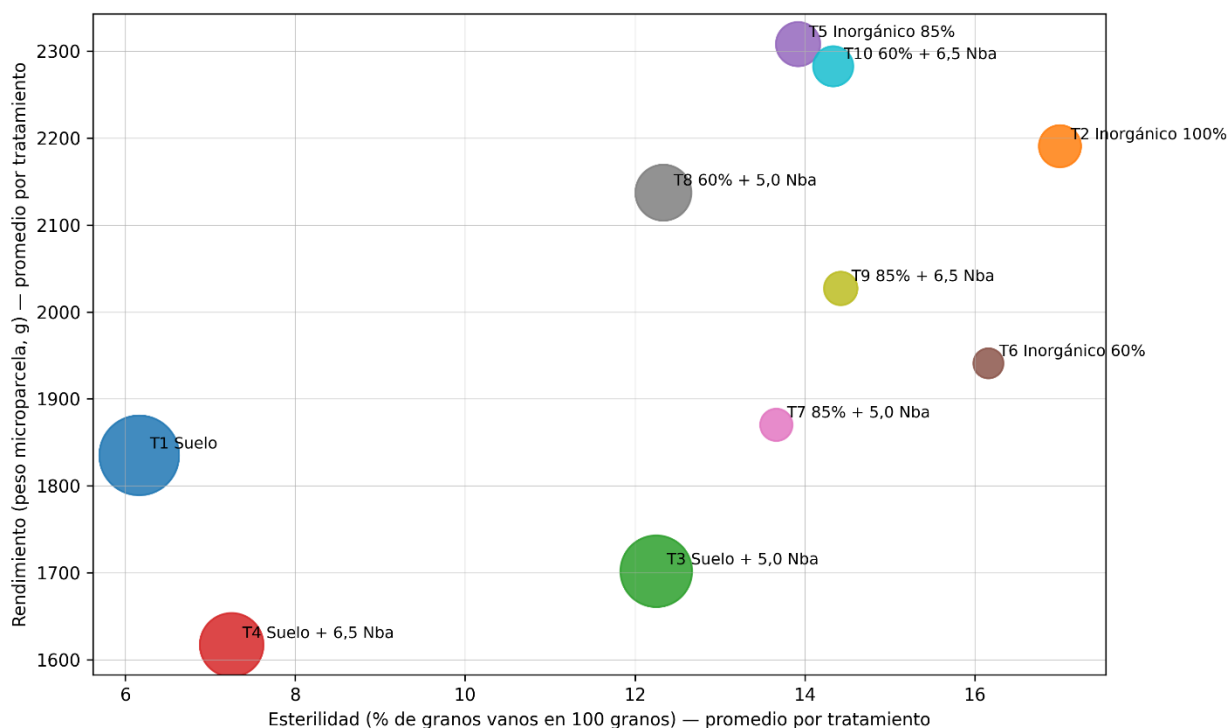
También, Navarrete et al. (2017) obtuvieron buenos rendimientos en el cultivo de arroz utilizando un programa de fertilización inorgánica en asociación con *Azospirillum*, ya que el rendimiento del grano aumentó en un 23,44% en comparación con las plantas tratadas solo con fertilización química y sin asociación de PGPR.

En la Figura 11 se presenta la relación entre esterilidad (porcentaje de granos vanos en una muestra de 100 granos), rendimiento (peso de microparcela) y el peso de 100 granos (tamaño de burbuja). Se observa que la esterilidad no explica por sí sola el rendimiento. Al respecto, se destaca que en varios tratamientos con mayor aporte de N (fertilización inorgánica y combinaciones con Nitrobacter®) alcanzaron los mayores rendimientos, aun cuando mostraron valores relativamente más altos de granos vanos. En contraste, los tratamientos sin fertilización (Suelo y Suelo + inoculante) presentaron menor esterilidad, pero también los rendimientos más bajos, esto demuestra que esta menor proporción de granos vanos podría reflejar una menor carga reproductiva (o número de espigas) bajo limitación de nutrientes, y una respuesta compensatoria donde el cultivo produce menos estructuras reproductivas pero las que logra desarrollar tienden a ser más funcionales (Liberatore et al., 2025).

También es importante mencionar, que la variedad Lazarroz FL ha reportado hasta 8- 9 ton ha⁻¹ en esquemas de producción, es decir, mediante manejos adecuados y con bajos niveles de estrés es posible que los granos vanos y el alto porcentaje de esterilidad que se encontraron en los tratamientos con mayor rendimiento disminuyan (CONARROZ, 2023).

Figura 11

Rendimiento vs esterilidad, burbuja= Peso 100 granos



Nota: Relación entre rendimiento, esterilidad y peso de 100 granos en respuesta a la aplicación de Nitrobacter, fertilización inorgánica y sus correspondientes combinaciones. Elaboración propia, 2025.

El tamaño de burbuja (peso de 100 granos) evidencia una posible compensación parcial del peso del grano bajo escenarios de menor productividad, mientras que en tratamientos con alto rendimiento se observa un menor peso de 100 granos, lo cual puede estar asociado a competencia por asimilados, a limitaciones en el llenado de estructuras reproductivas secundarias o inferiores (Chen et al., 2022), o al estrés provocado por presión de malezas en la etapa de llenado que influyeron en esterilidad y peso de 100 granos.

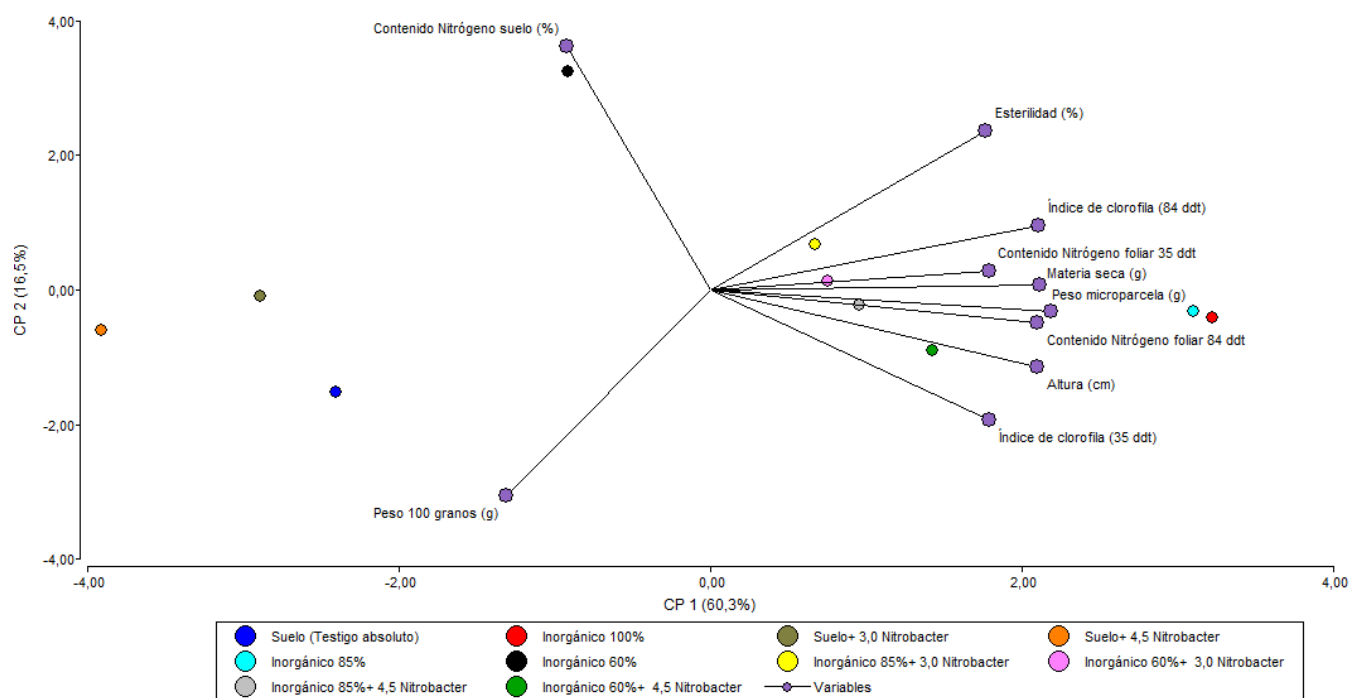
Existen reportes donde niveles moderados de N pueden favorecer procesos reproductivos, pero niveles elevados incrementan esterilidad y reducen fertilidad por un potencial desbalance fuente y

destino (Zhong et al., 2025). Asimismo, el llenado del grano depende de una adecuada traslocación de carbohidratos y N desde tallos y hojas durante la etapa reproductiva, y un exceso de N puede disminuir la eficiencia de esa traslocación, afectando especialmente espiguillas inferiores o secundarias y reduciendo el peso final del grano (Zhao et al., 2022).

Sin embargo, tal y como se mencionó anteriormente la variedad Lazarroz FL ha reportado hasta 8- 9 ton·ha⁻¹ en esquemas de producción con manejos adecuados. En esta investigación se reportaron algunos niveles de estrés ocasionados principalmente por arvenses. Los promedios más altos obtenidos fueron de 4 ton·ha⁻¹. Debido a esto, la alta esterilidad o granos vanos se generó producto de un estrés en la planta y no a una deficiente traslocación de asimilados (CONARROZ, 2023).

Análisis de componentes principales

En la Figura 12 se observa el Análisis de Componentes Principales (ACP) realizado con las variables asociadas al crecimiento, contenido de N en suelo y rendimiento del cultivo de arroz bajo diferentes tratamientos. Existe una clara distribución de los tratamientos en función de los dos componentes principales (CP1 y CP2). La distribución explica en conjunto el 76,8% de la variabilidad total observada.

Figura 12*Análisis de componentes principales (ACP)*

Nota: Relación entre tratamientos y variables de crecimiento y productividad en respuesta a la aplicación de Nitrobacter, fertilización inorgánica y sus correspondientes combinaciones. Elaboración propia, 2024.

En la Figura 12 se evidencia un agrupamiento en el cuadrante derecho del gráfico de los tratamientos con fertilización inorgánica al 100% y 85% (mayor rendimiento), así como los tratamientos con 60% de N y 6,5 L·ha⁻¹ de Nitrobacter®. Estos tratamientos se relacionan de manera positiva con las variables índice de clorofila (35 y 84 ddt), altura de planta, materia seca, contenido de N foliar (84 ddt) y peso microparcela (rendimiento), esto indica un comportamiento agronómico favorable en términos de crecimiento y productividad.

Además, se observa el tratamiento con fertilización al 60% sin inoculación en el cuadrante izquierdo alejado de variables de crecimiento y rendimiento que demuestra la influencia positiva de la asociación con las bacterias del producto Nitrobacter®. Al contrario, tal y como se muestra en el gráfico,

la relación positiva en variables de crecimiento y rendimiento al combinar la fertilización al 85% y 60% con el inoculante. En el análisis de la variable rendimiento, los datos se relacionan con el estrés nutricional y la necesidad de la planta de reclutar a bacterias presentes en el medio para favorecer la absorción de nutrientes y la compensación nutricional.

Tal y como se mencionó anteriormente, se realizaron análisis de presencia de las bacterias (UFC) a los 35 ddt y 105 ddt y no se encontraron diferencias entre los tratamientos (Anexo 6). Es decir, en estos dos momentos de evaluaciones las bacterias no estaban presentes en el suelo. Debido a lo anterior es recomendable aumentar los análisis durante el ciclo de producción para evaluar la sobrevivencia de las bacterias en el tiempo.

Los tratamientos sin fertilización (suelo) y aquellos inoculados únicamente con Nitrobacter® en ausencia de fertilización inorgánica (5,0 y 6,5 l ha⁻¹) se ubican en el cuadrante izquierdo, alejados del grupo de mayor productividad. Estos se asocian únicamente a un mayor peso de 100 granos, pero también a menor desarrollo vegetativo y menor biomasa acumulada.

También, cabe recalcar la relación directa que existe entre crecimiento de las plantas de arroz (Materia seca, altura) y rendimiento (Peso de la microparcela) con el índice de clorofila y N foliar a los 35 y 84 ddt. Esto valida que el uso de variables de crecimiento como altura y materia seca explican el rendimiento en el cultivo de arroz y son de vital importancia en ensayos de este tipo.

Por último, es importante mencionar que, una medida no destructiva con el SPAD de índice de clorofila a los 35 ddt es un indicador de rendimiento. Esto permitiría hacer estimaciones de rendimiento o ajustar planes de fertilización en etapas fenológicas tempranas del cultivo.

Costo económico del uso de Nitrobacter® y dosis reducidas de urea dentro de un plan de fertilización inorgánica

Se determinó el costo económico de la aplicación de Nitrobacter® en las dosis de 5,0 y 6,5 L·ha⁻¹ y urea en la dosis de 100%, 85% y 60% correspondiente a 435 kg·ha⁻¹, 370 kg·ha⁻¹ y 261 kg·ha⁻¹ del fertilizante inorgánico respectivamente. Además, se cuantificó el costo de mano de obra de la aplicación de estos insumos.

El restante de costos de producción correspondientes a mecanización, administrativos, aplicación de plaguicidas y fertilización de fósforo y potasio no se cuantificaron porque se consideran homogéneas para todos los tratamientos. Los cálculos corresponden únicamente a la fertilización relacionada con el uso de Nitrobacter® y urea como estimación del margen parcial de ganancia bajo este esquema.

Costo de la aplicación de urea por hectárea

El costo de fertilización nitrogenada con urea se calculó multiplicando la dosis aplicada (kg por hectárea) por el precio unitario del fertilizante (¢412,5 por kg). Este valor está basado en un precio de ¢18 975 por quintal (46 kg).

El costo de mano de obra se calculó contemplando tres aplicaciones (dosificado) durante el ciclo del cultivo. El jornal de un trabajador no calificado se estimó en ¢13 000, en este caso se utilizó el valor de referencia de ¢1 625 por hora.

El tiempo de aplicación del fertilizante al voleo por parcela de 6 m² fue de 20 segundos, con 10 parcelas por tratamiento (tres aplicaciones), resultando en un tiempo total de 600 segundos (10 minutos) por tratamiento. Lo anterior se extrapoló a una hectárea y se consideró el mismo ritmo de trabajo. Para completar las tres aplicaciones en la hectárea se requiere de 27.78 horas.

El tiempo total se multiplicó por el costo horario de la mano de obra para obtener \$45 138,33 por hectárea para la aplicación del fertilizante. Por último, el costo total del plan de N se calculó con la sumatoria del costo del fertilizante y el costo de mano de obra (Tabla 4).

Tabla 4

Costo de la aplicación de urea por hectárea

Tratamiento	Descripción	Urea (kg ha ⁻¹)	Costo (¢)	Urea	Mano de obra (¢)	Costo total (¢ ha ⁻¹)
T1	Suelo (testigo absoluto)	0	0	0	0	0
T2	Inorgánico 100 %	435.0	179 438	45 138	224 576	
T3	Suelo + Nitrobacter® 5.0	0	0	0	0	
T4	Suelo + Nitrobacter® 6.5	0	0	0	0	
T5	Inorgánico 85 %	370.0	152 625	45 138	197 763	
T6	Inorgánico 60 %	261.0	107 663	45 138	152 801	
T7	Inorgánico 85 % + Nitrobacter® 5.0	370.0	152 625	45 138	197 763	
T8	Inorgánico 60 % + Nitrobacter® 5.0	261.0	107 663	45 138	152 801	
T9	Inorgánico 85 % + Nitrobacter® 6.5	370.0	152 625	45 138	197 763	
T10	Inorgánico 60 % +	261.0	107 663	45 138	152 801	

Nitrobacter®
6.5

Nota. Elaboración propia, 2025.

Costo de la aplicación de Nitrobacter® por hectárea

El costo del inoculante Nitrobacter® se calculó multiplicando la dosis aplicada ($\text{L}\cdot\text{ha}^{-1}$) por el precio unitario del producto (¢12 600 por litro), correspondiente el valor promedio consultado en dos agroservicios de Cañas y Parrita (enero 2026).

El costo de mano de obra se calculó según tres aplicaciones (dosificado) durante el ciclo del cultivo. El jornal de un trabajador no calificado se estimó en ¢13 000, en este caso se utilizó el valor de referencia de ¢1 625 por hora.

El tiempo requerido para aplicar el producto en una parcela de 6 m^2 fue de 20 segundos por aplicación, con 10 parcelas por tratamiento y tres aplicaciones (10 minutos) por tratamiento. Extrapolando este tiempo a una hectárea y considerando un ritmo constante de trabajo, se estimó un tiempo total de 27,78 horas para realizar las aplicaciones en la hectárea.

El tiempo anterior se multiplicó por el costo de la mano de obra y se calculó un costo de ¢45 138,33 por hectárea para la aplicación del biofertilizante. Además, el costo total del plan de N se calculó como la suma del costo de Nitrobacter® y el costo de la mano de obra (Tabla 5).

Tabla 5

Costo de la aplicación de Nitrobacter® por hectárea

Tratamiento	Descripción	Dosis Nitrobacter® ($\text{L}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Costo producto (¢)	Mano de obra (¢)	Total ha^{-1} (¢)
T1	Suelo (testigo absoluto)	0	0	0	0
T2	Inorgánico 100 %	0	0	0	0

T3	Suelo + Nitrobacter®	5.0	63 000	45 138	108 139
T4	Suelo + Nitrobacter®	6.5	81 900	45 138	127 039
T5	Inorgánico 85 %	0	0	0	0
T6	Inorgánico 60 %	0	0	0	0
T7	Inorgánico 85 % + Nitrobacter®	5.0	63 000	45 138	108 139
T8	Inorgánico 60 % + Nitrobacter®	5.0	63 000	45 138	108 139
T9	Inorgánico 85 % + Nitrobacter®	6.5	81 900	45 138	127 039
T10	Inorgánico 60 % + Nitrobacter®	6.5	81 900	45 138	127 039

Nota. Elaboración propia, 2025.

Costo de la aplicación de Nitrobacter® y urea por hectárea

En la tabla 6 se observa el costo de urea, Nitrobacter®, mano de obra y el costo total por hectárea de los diferentes tratamientos evaluados. Se observa que en los tratamientos en donde se combina la fertilización con urea y el inoculante se duplica la mano de obra, esto debido a que se realizan en momentos diferentes (se detalla en la metodología). Se realizó de esta manera debido a la recomendación de no aplicar urea y PGPR al mismo tiempo para evitar interferencias en la supervivencia de la bacteria. Sin embargo, conforme disminuye la dosis de urea y la dosis de Nitrobacter® también disminuye el costo total de plan de N.

Tabla 6*Costo de la aplicación de Nitrobacter® y urea por hectárea*

Tratamiento	Descripción	Costo Urea (₡)	Costo Nitrobacter® (₡)	Mano de obra (₡)	Costo total del plan de N (₡·ha⁻¹)
T1	Suelo (testigo absoluto)	0	0	0	0
T2	Inorgánico 100 %	179,438	0	45 138	224 576
T3	Suelo + Nitrobacter® 5.0	0	63 000	45 138	108 138
T4	Suelo + Nitrobacter® 6.5	0	81 900	45 138	127 038
T5	Inorgánico 85 %	152,625	0	45 138	197 763
T6	Inorgánico 60 %	107,663	0	45 138	152 801
T7	Inorgánico 85 % + Nitrobacter® 5.0	152,625	63 000	90 276	305 901
T8	Inorgánico 60 % + Nitrobacter® 5.0	107,663	63 000	90 276	260 939
T9	Inorgánico 85 % + Nitrobacter® 6.5	152,625	81 900	90 276	324 801
T10	Inorgánico 60 % + Nitrobacter® 6.5	107,663	81 900	90 276	279 839

Nota. Elaboración propia, 2025.

Análisis económico de los tratamientos evaluados

A partir de los rendimientos obtenidos en cada tratamiento y considerando un precio de venta de \$20 360 (CONARROZ, 2024) por saco de 73,6 kg, equivalente a \$276 630 por tonelada se calculó el ingreso por tratamiento (Tabla 7).

El costo total por hectárea se calculó de manera parcial anteriormente en función del uso de fertilizantes inorgánicos (urea), biofertilizante Nitrobacter® y los costos asociados de mano de obra. La utilidad parcial neta se determinó como la diferencia entre el ingreso bruto y el costo total del plan de N.

Tabla 7

Utilidad parcial neta

Tratamiento	Descripción	Rend (t·ha ⁻¹)	Ingreso (\$)	Costo total fertilización nitrogenada (\$)	Utilidad parcial neta (\$)
T1	Suelo (Testigo absoluto)	3.06	846 488	0	846 488
T2	Inorgánico 100%	3.65	1 009 700	224 576	785 124
T3	Suelo + 5.0 Nitrobacter®	2.84	785 629	108 138	677 491
T4	Suelo + 6.5 Nitrobacter®	2.7	746 901	127 038	619 863
T5	Inorgánico 85%	3.85	1 065 026	197 763	867 263
T6	Inorgánico 60%	3.24	896 281	152 801	743 480
T7	Inorgánico 85% + 5.0 Nitrobacter®	3.12	863 086	305 901	557 185
T8	Inorgánico 60% + 5.0 Nitrobacter®	3.56	984 803	260 939	723 864

T9	Inorgánico 85% + 6.5 Nitrobacter®	3.38	935 009	324 801	610 801
T10	Inorgánico 60% + 6.5 Nitrobacter®	3.81	1 053 960	279 839	774 121

Nota. Elaboración propia, 2025.

Según la tabla 7, el tratamiento con la mayor utilidad parcial neta correspondió al uso de urea en la dosis de 85% sin la incorporación de la bacteria. Esto debido a que tuvo el mayor rendimiento (3.85 ha^{-1}) a pesar de no tener la totalidad de fertilizante nitrogenado recomendado para la variedad Lazarroz FL en la zona de Cañas, Guanacaste. En este caso la aplicación del 85% del total de N permite un ahorro de $\$26\,813 \text{ ha}^{-1}$ de urea y un margen de ganancia parcial de $\$82\,139$ superior en comparación con el tratamiento al 100% de fertilizante inorgánico. En conjunto, estos resultados sugieren que una reducción de 15% de urea, no afecta el rendimiento, permite ahorrar en fertilizante y se obtiene una ganancia 10,5% superior en comparación con una fertilización al 100% de urea.

Otro tratamiento que tuvo un margen de ganancia alto fue el testigo absoluto (sin ningún tipo de aplicación), debido a su rendimiento intermedio (3.06 ha^{-1}) y sus costos nulos en la aplicación de insumos nitrogenados. Sin embargo, son resultados atípicos que pueden suceder en este tipo de investigaciones, por ejemplo, movilización de N de algunas parcelas, mineralización de materia orgánica, etc. En producción, no aplicar N incrementa el riesgo de bajo macollamiento, área foliar, mal llenado de grano y estrés en la planta, por lo que no se recomienda como estrategia de manejo. En este sentido, el testigo se utiliza principalmente como referencia para determinar la respuesta del cultivo al N y estimar el aporte relativo del suelo, más que como una alternativa realista y productiva.

Un tratamiento con una alta utilidad parcial neta correspondió a la fertilización inorgánica nitrogenada al 100% con ₡785 124 por hectárea. Este tratamiento incorporó la dosis total de urea generando un costo por el insumo y su aplicación de ₡224 576.

Dentro de los tratamientos que incorporaron el inoculante microbiano, el de mayor utilidad parcial neta fue T10 (60% de N + 6,5 L·ha⁻¹ de Nitrobacter®), con ₡774 121 ha⁻¹. Este valor fue 10,7% inferior al tratamiento con mayor utilidad (85% de N sin inoculante) y 1,4% inferior al tratamiento con 100% de urea. Esto sugiere que es posible reducir la dosis de N mineral en un 40% y mantener una utilidad parcial neta cercana a la fertilización al 100%, lo que podría representar una alternativa ambiental y económicamente viable.

Es importante mencionar que en esta investigación el uso de 60% de N + 6,5 L·ha⁻¹ de Nitrobacter® tuvo rendimientos estadísticamente similares a los tratamientos con 100% y 85% de N, sin embargo, no tuvo la mejor utilidad parcial neta, considerando los costos de mano por aplicación del inoculante.

Para realizar los cálculos se utilizó como referencia el costo actual (enero 2026) de urea (₡412,5 por kg), relativamente estable a la fecha pero que tiene alta variabilidad siendo dependiendo de cambios en los mercados. Incluso en 2021 debido al COVID-19 el kg llegó a costar ₡909,7 (MAG, 2022), un aumento del 120,5%. Bajo ese escenario, en esta investigación los tratamientos 100 y 85% de N hubieran tenido márgenes de ganancia de ₡568 842·ha⁻¹ y ₡683 299·ha⁻¹, una disminución de 27,5% y 21,2% respectivamente (siendo así, de los márgenes de ganancia parcial neta más bajos). Estos fertilizantes inorgánicos son insumos importados con alta variabilidad en los precios, lo cual es una señal para limitar su uso incorporando otro tipo de alternativas como son los PGPR.

Reducir la dosis de N mineral y la dependencia de insumos externos es relevante porque fortalece la resiliencia económica del productor. La FAO destaca que, al mejorar procesos biológicos y el

reciclaje de nutrientes, los sistemas pueden producir más usando menos recursos externos o importados, esto reduce costos ante la volatilidad de precios, impactos ambientales y favorece la autonomía del productor. Los enfoques agroecológicos tienen como objetivo reducir el uso de insumos como fertilizantes inorgánicos y así promover agroecosistemas más resilientes (High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition [HLPE], 2019).

Esto es de importancia porque el mercado de fertilizantes ha mostrado alta volatilidad (fuertes alzas en 2021–2022), lo que incrementa el riesgo financiero. Es por esto por lo que, estrategias que mantienen el rendimiento con menores dosis de N (como un manejo 60% de urea + 6,5 L·ha⁻¹ de Nitrobacter®) son coherentes con un manejo más sostenible y menos expuesto a variaciones de precios.

Otra forma de mejorar los márgenes de ganancia es, comercializar el grano por diferenciación en su menor impacto ambiental bajo algún sello, sin embargo, actualmente en nuestro país no existen estrategias económicas para incentivar el uso de prácticas sostenibles como la incorporación de PGPR. Esto se menciona en el NAMA arroz cuando se dice que “actualmente los mecanismos de incentivos a productores que implementen cambios tecnológicos para reducir GEI son deficientes”, el NAMA arroz aún está en pruebas piloto y construcción de este tipo de estrategias (MAG, 2022).

En consecuencia, en el corto plazo la rentabilidad de estrategias como la reducción de N con apoyo de PGPR tiende a explicarse más por eficiencia y menor dependencia de insumos externos que por un sobreprecio de mercado. Sin embargo, la NAMA también plantea que para posicionar “arroz bajo en carbono o con menor uso de fertilizante” se requieren condiciones que incluyan financiamiento de la agrocadena y mecanismos de mercadeo y comercialización como certificaciones y diferenciación respaldadas por un sistema de medición, reporte y verificación que provea evidencia del atributo ambiental (MAG, 2022).

En nuestro país existen algunos esfuerzos para diferenciar la producción de arroz por su manejo ecológico o con menor impacto ambiental como lo es la línea BIO Arroz de Tío Pelón bajo el eslogan de “Arroz libre de pesticidas” (Tío Pelón, s.f.). También existe ECO Arroz como “primer arroz certificado libre de pesticidas”, certificado por Kiwa BCS. Las anteriores son certificadas por entes internacionales, lo cual conlleva costos administrativos y operativos considerables según el contexto del productor.

Es importante señalar que actualmente la mayoría del arroz consumido en el país proviene de la importación (85%), y que este arroz importado suele ingresar al mercado nacional con precios competitivos, asociados a menores costos de producción en sus países de origen. En este contexto, la producción arrocería nacional enfrenta el reto de reducir sus costos sin afectar el rendimiento, al mismo tiempo, avanzar hacia estrategias de diferenciación (arroz con menor impacto ambiental o producido con prácticas más sostenibles) que mejoren su posicionamiento y competitividad en el mercado interno (CONARROZ, 2023).

La inoculación con *Nitrobacter*[®] se realizó en tres dosis, aplicadas en momentos diferentes, lo cual aumentó los costos en mano de obra, aunque permitió crecimiento de la planta y buena productividad. Sin embargo, es relevante evaluar otras formas de aplicación como el uso de drones, una única aplicación, inocular la semilla, inmersión de raíces o combinar la inoculación con la incorporación de otros insumos para disminuir los costos asociados a mano de obra.

En el caso de Grupo Pelón realizan aplicaciones de PGPR mediante inoculaciones con dron, el cual reportan que aumentan la eficiencia disminuyendo costos de producción (Tío Pelón, s.f.). En siembra directa, se ha reportado la inoculación de semilla mediante recubrimiento, donde el inoculante se fija a la semilla con ayuda de un adhesivo (Rocha et al., 2019). En sistemas de trasplante de arroz la inmersión de raíces en una suspensión del inoculante antes del trasplante aumenta el contacto PGPR-raíz y la probabilidad de colonización. Se ha documentado que el tratamiento de plántulas y su posterior

trasplante a campo puede incrementar macollamiento y rendimiento con menores costos operativos (Murunde et al., 2023).

Bajo las condiciones del ensayo (riego intermitente), la reducción de la dosis nitrogenada desde 200 kg N·ha⁻¹ (435 kg urea·ha⁻¹) hasta 120 kg N·ha⁻¹ (261 kg urea·ha⁻¹) representa una disminución del 40% en la entrada de N sintético al sistema, esto tiene una implicación ambiental relevante.

En arroz con riego intermitente, el IPCC [Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático] (2019,) sugiere un factor de emisión directo de EF1FR = 0,005 kg N₂O–N por kg N aplicado, por lo que una reducción de 80 kg N·ha⁻¹ podría traducirse, en primera aproximación (Tier 1), en una disminución de 0,40 kg N₂O–N·ha⁻¹, equivalente a 0,63 kg N₂O·ha⁻¹ o aproximadamente 172 kg CO₂e·ha⁻¹ (GWP100 AR6: 273 para N₂O). Además, al aplicar menos urea (–174 kg·ha⁻¹), se reduce el CO₂ asociado a su aplicación, el IPCC 2006 considera un factor de emisión para urea de 0,20 t C por t de urea, esto corresponde a una reducción aproximada de 128 kg CO₂·ha⁻¹ (IPCC, 2006 y IPCC, 2019). En total corresponde a 300 kg CO₂e·ha⁻¹ por ciclo solo por estas dos fuentes asociado al N aplicado y a la urea.

En conjunto, estos resultados respaldan que estrategias de reducción de N con apoyo de PGPR que mantengan la rentabilidad pueden aportar co-beneficios ambientales al disminuir emisiones estimadas de GEI asociadas al fertilizante. Estas cifras corresponden a estimaciones por factores y su confirmación requeriría mediciones directas de flujos de GEI en campo.

Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones

1. La fertilización nitrogenada fue un factor importante para la productividad de la variedad Lazarroz FL, ya que los tratamientos que no recibieron N (suelo y suelo + Nitrobacter®) presentaron los rendimientos más bajos ($<3,1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) mientras que aquellos con aplicación de N lograron producciones superiores a las $3,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, demostrando la importancia de este nutriente para alcanzar rendimientos superiores en una cosecha.

2. Es posible optimizar la fertilización nitrogenada de la variedad Lazarroz FL sin afectar negativamente el rendimiento. La reducción de N al 85% ($170 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$), sin Nitrobacter®, no solo mantuvo la productividad ($3,85 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$), sino que la incremento en un 5,48%, respecto al 100% de N, ($3,65 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$), alcanzando la mayor utilidad parcial, lo que demuestra una mayor eficiencia en el uso de N aplicado. Además, una reducción más drástica del N al 60% ($120 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$) sin inoculación de Nitrobacter® provocó limitaciones nutricionales y una disminución del desempeño productivo, evidenciándose que reducciones significativas en la cantidad de N deben ir acompañadas de estrategias complementarias para evitar pérdidas en el rendimiento.

3. La aplicación de 60% de N combinada con Nitrobacter® ($6,5 \text{ L} \cdot \text{ha}^{-1}$) permite mantener e incluso superar ligeramente el rendimiento ($3,81 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) en relación con el obtenido con el 100% de N ($3,65 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$), logrando una reducción del 40% en la fertilización nitrogenada sin afectar negativamente la productividad. Sin embargo, el efecto del inoculante depende del nivel de N aplicado, ya que no mostró beneficios adicionales cuando se combinó con 85% de N. Por lo tanto, Nitrobacter® presenta mayor utilidad agronómica en esquemas de fertilización reducida, donde contribuye a optimizar el uso del N mineral.

4. Una reducción moderada de la dosis de N puede ser una estrategia económicamente más eficiente que la fertilización convencional. El manejo con 85% N sin inoculante se evidenció como la alternativa más rentable, superando al 100% N en margen económico, lo que demuestra que es posible mantener la productividad y mejorar la rentabilidad. Por su parte, el tratamiento 60% N + Nitrobacter® (6,5 L·ha⁻¹) alcanzó una utilidad comparable al 100% N; sin embargo, su viabilidad económica está condicionada por los mayores costos asociados a la logística y número de aplicaciones. En este sentido, el uso de PGPR resulta atractivo solo si se optimizan los procesos de aplicación, afirmando que la eficiencia económica depende no solo del insumo utilizado, sino también de su manejo en campo.

5. Las diferencias entre la concentración declarada y la efectivamente observada del inoculante evidencian que la eficacia de los PGPR en condiciones de campo depende de manera crítica de la calidad real del producto, por lo que la verificación y el control de calidad se vuelven determinantes para asegurar respuestas agronómicas consistentes y confiables.

Recomendaciones a investigaciones futuras

1. Repetir el ensayo en al menos dos ciclos productivos y bajo una mayor diversidad de condiciones edáficas y de manejo (textura del suelo, contenido de materia orgánica, historial de fertilización, tipo y régimen de riego), con el fin de evaluar de manera más robusta la consistencia y estabilidad de la respuesta a PGPR en distintos ambientes productivos.

2. Evaluar y comparar esquemas de aplicación que permitan reducir costos de mano de obra y aumentar la eficiencia agronómica del inoculante, tales como la inoculación directa de semilla, una única aplicación dirigida a la etapa fenológica crítica del cultivo, la aplicación mediante dron, o el uso de formulaciones que mejoren la persistencia y viabilidad del microorganismo en campo.

2. Incrementar la frecuencia de muestreo en rizosfera y tejidos internos, especialmente en periodos críticos posteriores a la aplicación del inoculante, y complementar el recuento de UFC con

técnicas moleculares de mayor sensibilidad (qPCR y/o marcadores específicos) que permitan confirmar la colonización efectiva y movilidad de los microorganismos en los tejidos de la planta. Esto facilitará establecer una relación más certera entre la dinámica microbiana, los indicadores fisiológicos del cultivo (SPAD, N foliar) y el rendimiento.

3. Evaluar esquemas de fertilización con niveles intermedios de N (por ejemplo, 70–75% del N recomendado), con y sin inoculante, para evaluar la curva dosis–respuesta e identificar el umbral óptimo que maximice la rentabilidad, mantenga la estabilidad del rendimiento y reduzca el riesgo de pérdidas productivas.

3. Complementar las estimaciones con mediciones *in situ* de emisiones de N_2O y CH_4 mediante cámaras estáticas, e integrar un balance completo de GEI bajo esquemas de riego intermitente. Esto permitirá cuantificar co-beneficios ambientales asociados a la reducción de N y al uso de inoculantes, Realizar fortaleciendo la evaluación de sostenibilidad del sistema productivo.

4. Realizar un análisis económico más sensible que incorpore escenarios de precio del fertilizante nitrogenado, costo de mano de obra, costo del inoculante y rendimiento.

Recomendaciones prácticas

1. Aplicar el 85 % de la dosis de N ($170 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$) a la variedad Lazarroz FL en condiciones agroclimáticas similares a las de Cañas, Guanacaste, sin inoculante, ya que este tratamiento evidenció el mayor rendimiento y la mayor utilidad parcial. Esto se debe principalmente al ahorro en urea, sin incurrir en costos adicionales por la mano de obra en la aplicación del inoculante.

2. No se recomienda hacer la aplicación de 60% sin inoculación debido a que la reducción de N no supe la demanda del cultivo.

3. Evitar usar Nitrobacter® con 85% N porque no mejoró el rendimiento al combinarse con esa dosis de fertilizante.

4. Implementar mediciones SPAD en etapas tempranas del cultivo para evaluar el estado nutricional de N y estimar el rendimiento potencial. Esta práctica permite optimizar la fertilización, evitando tanto deficiencias como aplicaciones excesivas de N.

5. Mantener la cadena de calidad básica del inoculante microbiano para lo cual se debe: evaluar concentración del inoculante, almacenar en condiciones de temperatura adecuada, evitar exposición prolongada al sol, preparar mezcla justo antes de aplicar y usar agua limpia.

6. Coordinar la aplicación junto con labores planificadas o evaluar formas de aplicación para aumentar la probabilidad de que la aplicación de 60% de N + Nitrobacter® sea más rentable disminuyendo los costos en mano de obra.

Bibliografía

- Aguirre Elizondo, R. C. (2018). *Efecto de rizobacterias promotoras de crecimiento (RPC) sobre el arroz (Oryza sativa L) en invernadero bajo condiciones de estrés hídrico*.
<http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/6323/1/43767.pdf>
- Alcedo, Y. C., y Reyes, I. (2018). Microorganismos promotores de crecimiento en el biocontrol de *Alternaria alternata* en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Bioagro*, 30(1), 59-66.
- Alvarez, M., Tucta, F., Quispe, E., y Meza, V. (2018). Incidencia de la inoculación de microorganismos benéficos en el cultivo de fresa (*Fragaria* sp.). *Scientia Agropecuaria*, 9(1), 33-42.
- Alzate Zuluaga, M. Y., Fattorini, R., Cesco, S., y Pii, Y. (2024). *Biofertilizers based on plant growth-promoting bacteria: A sustainable tool for enhancing crop productivity and soil health*. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1440978. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1440978>
- Aminpanah, H., y Firouzi, S. (2019). Fertilizer management using plant growth-promoting rhizobacteria in rice fields. *International Journal of Agricultural Management and Development*, 9(1), 67–76.
- Apuy Porras, E., y Wong Delgado, S. (2022). *Evaluación de la relación de tres densidades de siembra de la variedad LAZARROZ FL (Oryza sativa), bajo la modalidad de riego suplementario por goteo, Cañas, Guanacaste, 2021* [Trabajo final de graduación, Universidad Técnica Nacional]. Recuperado de <https://repositorio.utn.ac.cr/items/f836c8f4-e521-498f-a3ba-cb33adfecb92>
- Arias-Badilla, J. G., Esquivel-Segura, E. A., y Campos-Rodríguez, R. (2020). Evaluación de la densidad de siembra y nivel de fertilización en arroz, para las variedades Palmar-18, Lazarroz FL y NayuribeB FL, en Parrita (Pacífico Central), Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, pag-13.

- Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., ... y Smith, D. L. (2018). *Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and environmental applications. Frontiers in Plant Science, 9*, 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
- Banik, A., Dash, G. K., Swain, P., Kumar, U., Mukhopadhyay, S. K., & Dangar, T. K. (2019). Application of rice (*Oryza sativa* L.) root endophytic diazotrophic *Azotobacter* sp. strain Avi2 (MCC 3432) can increase rice yield under green house and field condition. *Microbiological Research, 219*, 56–65.
doi:10.1016/j.micres.2018.11.004
- Barbosa, J. Z., Roberto, L. de A., Hungria, M., Corrêa, R. S., Magri, E., y Correia, T. D. (2022). *Meta-analysis of maize responses to Azospirillum brasilense inoculation in Brazil: Benefits and lessons to improve inoculation efficiency. Applied Soil Ecology, 170*, 104276. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104276>
- Barquero, M. (2021). CONARROZ pedirá aumento en precios del grano. *La Nación*. Recuperado de <https://www.nacion.com/economia/agro/conarroz-pedira-aumento-en-precios-del-grano/43LUAQXJSNGCNJL7UQBVG5B2M/story/>
- Bashan, Y., y de-Bashan, L. E. (2010). How the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* promotes plant growth—A critical assessment. *Advances in Agronomy, 108*, 77–136. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08002-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08002-3)
- Bertsch, F. (2009). *Absorción de nutrientes por los cultivos (multimedia)*. San José, Costa Rica, ACCS, 170.
- Biochemistry. (2017). *El complejo de proteínas FixABCX de bifurcación de electrones de Azotobacter vinelandii: generación de equivalentes reductores de bajo potencial para la catálisis de nitrogenasa.* <https://doi.org/10.1021/acs.biochem.7b00389>.

- Calvo, P., Zebelo, S., McNear, D., Kloepper, J., y Fadamiro, H. (2019). Plant growth-promoting rhizobacteria induce changes in *Arabidopsis thaliana* gene expression of nitrate and ammonium uptake genes. *Journal of Plant Interactions*, 14(1), 224–231. <https://doi.org/10.1080/17429145.2019.1602887>
- Cassán, F., Coniglio, A., López, G., Molina, R., Nievas, S., de Carlan, CLN, y Mora, V. (2020). Todo lo que debe saber sobre Azospirillum y su impacto en la agricultura y otros ámbitos. *Biología y Fertilidad de Suelos*, 56 (4), 461-479. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00374-020-01463-y>
- Cassán, F., y Díaz-Zorita, M. (2016). Azospirillum sp. en la agricultura actual: del laboratorio al campo. *Soil Biology y Biochemistry*, 103, 117-130.
- CEPAL, NDF, BID, FAO, CGIAR/CCAFS, PROGRESAN y INCAP. (2018). *Cambio climático y seguridad alimentaria y nutricional en Centroamérica y la República Dominicana: Propuestas metodológicas*. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/44056-cambio-climatico-seguridad-alimentaria-nutricional-centroamerica-la-republica>
- Chen, Y., Teng, Z., Yuan, Y., Yi, Z., Zheng, Q., Yu, H., ... y Ye, N. (2022). *Excessive nitrogen in field-grown rice suppresses grain filling of inferior spikelets by reducing the accumulation of cytokinin and auxin*. *Field Crops Research*, 283, 108542.
- Cheng, Q., Ma, C., & Wang, X. (2026). *Biological nitrogen and carbon fixation: Bridging the gap between synthetic symbioses and synthetic biology*. *The Crop Journal*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2026.01.002>
- CONARROZ (Corporación Nacional Arrocera). (2023). *Informe anual. Centro estadístico arrocero*. Recuperado de Chromeextension://efaidnbmnnnibpajpcglclefindmkaj/https://conarroz.com/userfile/file/Operaciones/Informeannual estadístico22-23.pdf

CONARROZ (Corporación Nacional Arroceras). (2024). *Informe Anual Estadístico 2023-2024*.

<https://conarroz.com/userfile/file/Operaciones/InformeAnualEstad%C3%ADstico23-24final.pdf>

Coniglio, A., López, G., Gualpa, J., Molina, R., Rosas, S., Puente, M. y Cassán, F. (2020). Desarrollo de marcadores moleculares del tipo SCAR para la identificación de *Azospirillum brasilense* Az39. *Revista Argentina de Microbiología*, 52(1), 50-60.

Corporación Arroceras Nacional [CONARROZ]. (2025, febrero). Boletín mensual. *Situación actual del mercado de arroz*. <https://conarroz.com/userfile/file/Operaciones/Bolet%C3%ADnfeb2025.pdf>

Corporación Nacional Arroceras (CONARROZ). (2023). *Informe anual estadístico 2022/2023*. Centro Estadístico Arroceras. Recuperado de sitio oficial de CONARROZ

Corporación Nacional Arroceras [CONARROZ]. (2025, enero). *Situación actual del mercado del arroz* [Boletín mensual; presentación de PowerPoint].
<https://conarroz.com/userfile/file/Operaciones/Bolet%C3%ADnene2025.pdf>

de Andrade, L. A., Santos, C. H. B., Frezarín, E. T., Sales, L. R., y Rigobelo, E. C. (2023). Plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agricultural production. *Microorganisms*, 11(4), 1088.

del Carmen López-Ferrer, U., Brito-Vega, H., López-Morales, D., Salaya-Domínguez, J. M., y Gómez-Méndez, E. (2017). Papel de *Trichoderma* en los sistemas agroforestales-cacaotales como un agente antagónico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 20(1), 91-100.

Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). (2023). *Costa Rica rice situation update: Marketing year (MY) 2022/23*. GAIN Report CS2023-0010. Recuperado de USDA Foreign Agricultural Service website

Di Benedetto NA, Corbo MR, Campaniello D, Cataldi MP, Bevilacqua A, Sinigaglia M, Flagella Z. The role of Plant Growth Promoting Bacteria in improving nitrogen use efficiency for sustainable crop production: a focus

on wheat. *AIMS Microbiol.* 2017 Jun 7;3(3):413-434. doi: 10.3934/microbiol.2017.3.413. PMID: 31294169; PMCID: PMC6604983.

Dobermann, A., y Fairhurst, T. (2005). Manejo del nitrógeno en arroz. *Informaciones agronómicas* No. 58.

Recuperado de

[http://www.ipni.net/publication/ialahp.nsf/0/F3F3E0A8D944DCDC852579A30074445F/\\$FILE/Manejo%20del%20Nitr%C3%B3geno%20en%20Arroz.pdf](http://www.ipni.net/publication/ialahp.nsf/0/F3F3E0A8D944DCDC852579A30074445F/$FILE/Manejo%20del%20Nitr%C3%B3geno%20en%20Arroz.pdf)

Domingues Duarte, C. F., Cecato, U., Biserra, T. T., Mamédio, D., & Galbeiro, S. (2020). Azospirillum spp. in grasses and forages. Review. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11(1), 223–240.

<https://doi.org/10.22319/rmcp.v11i1.4951>

Dong, N., Prentice, I. C., Wright, I. J., Wang, H., Atkin, O. K., Bloomfield, K. J., Domingues, T. F., Gleason, S. M., Maire, V., Onoda, Y., Poorter, H., y Smith, N. G. (2022). Leaf nitrogen from the perspective of optimal plant function. *Journal of Ecology*, 110(11), 2585–2602. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13967>

Ehinmitan, E., Losenge, T., Mamati, E., Ngumi, V., Juma, P., y Siamalube, B. (2024). BioSolutions for green agriculture: unveiling the diverse roles of plant growth-promoting rhizobacteria. *International Journal of Microbiology*, 2024, 6181491. <https://doi.org/10.1155/2024/6181491>

Environmental Defense Fund. (2018). *Global risk assessment of high nitrous oxide emissions from rice production Incorporating the discovery of high N₂O fluxes under intermittent flooding*. https://www.edf.org/sites/default/files/documents/EDF_White_Paper_Global_Risk_Analysis.pdf

Fan, X., Naz, M., Fan, X., Xuan, W., Miller, A. J., y Xu, G. (2017). Plant nitrate transporters: from gene function to application. *Journal of Experimental Botany*, 68(10), 2463–2475.

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2002). *Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030. Informe resumido. Perspectivas para el medio ambiente: Agricultura y medio ambiente*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/y3557s/y3557s11.htm>
- FAOSTAT (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2022). *Datos. Total de emisiones*. Recuperado de <https://www.fao.org/faostat/es/#data/GT/visualize>
- FAOSTAT (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2019). *Dirección de estadística. Comparación de datos por países*, consultado el 25 de mayo del 2021.
<http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC/visualize>
- Fonseca-López, D., Vivas Quila, N. J., y Balaguera-López, H. E. (2020). Técnicas aplicadas en la investigación agrícola para cuantificar la fijación de nitrógeno: una revisión sistemática. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 21(1), 32-50.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2022, 22 de agosto). *Costa Rica elimina los precios de referencia del arroz y reduce los aranceles a la importación (Alertas de precios)*. Recuperado de <https://www.fao.org/giews/food-prices/food-policies/detail/es/c/1602693/m>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). *FAOSTAT: Production: Crops and livestock products. Datos sobre producción de arroz por región*. Recuperado de <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> [Reddit+2Open Knowledge](#) [FAO+2Open Knowledge](#) [FAO+2](#)
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2025). *Inorganic fertilizers. 2002–2023 (FAOSTAT highlights)*. Recuperado de <https://www.fao.org/statistics/highlights-archive/highlights-detail/inorganic-fertilizers-2002-2023>
- Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W., Dufresne, J.-L., Frame, D., Lunt, D. J., Mauritsen, T., Palmer, M. D., Watanabe, M., Wild, M., y Zhang, H. (2021). *The Earth's energy budget, climate feedbacks and*

- climate sensitivity*. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, y B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* (IPCC AR6 Working Group I). *Cambridge University Press*. doi:10.1017/9781009157896.009
- Franco, A. M., Pérez, C. A., Ruiz, J. H., Nieto, J. R., y Arriaga, A. M. (2021). Percepción e impacto del COVID 19 en el sector agroalimentario del estado de Guanajuato. *Jóvenes en la ciencia*, 10.
- Galindo, L. A. G., Rivas, A. C., Melendez, J. P., y Mayorquín, N. (2020). Alternativas microbiológicas para la remediación de suelos y aguas contaminados con fertilizantes nitrogenados. *Scientia et technica*, 25(1), 172-183.
- García de Salamone, I. E., Hynes, R. K., y Nelson, L. M. (2012). Role of plant growth-promoting rhizobacteria in enhanced plant growth and yield. *Canadian Journal of Microbiology*, 58(8), 1002–1011.
<https://doi.org/10.1139/w2012-082>
- Ge, Y., Zhang, JB, Zhang, LM, Yang, M. y He, JZ (2008). Long-term fertilization regimes and diversity of an agricultural affect bacterial community structure soil in northern China. *Journal Soils Sediments*, 8 (1), 43-50.
- Geisseler, D. y Scow, KM (2014). Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms- A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 75, 54-63.
- Gobierno de Costa Rica. (2018). *Plan Nacional de Descarbonización*. Recuperado de <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2019/11/PLAN-NACIONAL-DESCARBONIZACION.pdf?x76782>
- González, H., y Fuentes, N. (2017). Mecanismo de acción de cinco microorganismos promotores de crecimiento vegetal. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 34(1), 17-31.

Grupo Pelón. (s.f.). *BIO arroz*. Recuperado de <https://www.tiopelon.cr/productos/arroz/bio-arroz/>

Hernández-Ascencio, W. I. (2003). *Aislamiento e identificación de cepas de Azospirillum, y evaluación de su capacidad para suplir las necesidades de nitrógeno en plantas de oryza sativa (arroz)*.

Hernández-Chontal, M. A., Vázquez-Luna, D., Linares-Gabriel, A., Dios-León, G. E. D., Guerrero-Peña, A., y Rodríguez-Orozco, N. (2020). Efecto de la inoculación de *Azospirillum* spp. sobre el contenido nutrimental de moringa (*Moringa oleifera* Lam.). *Terra Latinoamericana*, 38(1), 29-38.

High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition. (2019). *Agroecological and other innovative approaches for sustainable agriculture and food systems that enhance food security and nutrition: Extract from the report Summary and recommendations (19 June 2019)*. Committee on World Food Security, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/hlpe/hlpe_documents/HLPE_S_and_R/HLPE_2019_Agroecological-and-Other-Innovative-Approaches_S-R_EN.pdf

Hosseiniyan Khatibi, S. M., Adviento-Borbe, M. A., Dimaano, N. G., Radanielson, A. M., & Ali, J. (2025). Advanced technologies for reducing greenhouse gas emissions from rice fields: Is hybrid rice the game changer? *Plant Communications*, 6(2), 101224. <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2024.101224>

IAEA y FAO. (2024). *Climate-Smart Agriculture Enables Asian Farmers to Increase Rice Productivity*. Recuperado de <https://www.iaea.org/newscenter/news/climate-smart-agriculture-enables-asian-farmers-to-increase-rice-productivity>

IDEAGRO. (sf). *Bacterias fijadoras de nitrógeno en agricultura, alternativa al uso de fertilización nitrogenada inorgánica*. Recuperado de <https://ideagro.es/bacterias-fijadoras-de-nitrogeno-en-agricultura-alternativa-al-uso-de-fertilizacion-nitrogenada->

[inorganica/#:~:text=Las%20bacterias%20fijadoras%20de%20nitr%C3%B3geno,ejercen%20estos%20efectos%20son%20variados.](#)

Index Mundi. (2022). *Precio de mercado. Urea*. Recuperado de <https://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=urea&meses=12>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). Chapter 11: N₂O emissions from managed soils, and CO₂ emissions from lime and urea application. In H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe (Eds.), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Vol. 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use). IPCC.

https://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_11_Ch11_N2O%26CO2.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). Chapter 11: N₂O emissions from managed soils, and CO₂ emissions from lime and urea application. In E. Calvo Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc, J. Baasansuren, M. Fukuda, S. Ngarize, A. Osako, Y. Pyrozhenko, P. Shermanau, & S. Federici (Eds.), 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Vol. 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use). IPCC.

https://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch11_Soils_N2O_CO2.pdf

Kaneko, T., Minamisawa, K., Isawa, T., Nakatsukasa, H., Mitsui, H., Kawaharada, Y., Nakamura, Y., Watanabe, A., Kawashima, K., Ono, A., Shimizu, Y., Takahashi, C., Minami, C., Fujishiro, T., Kohara, M., Katoh, M., Nakazaki, N., Nakayama, S., Yamada, M., ... Sato, S. (2010). Complete genomic structure of the cultivated rice endophyte *Azospirillum* sp. B510. *DNA Research*, 17(1), 37–50. doi:10.1093/dnares/dsp026

Kang, A., Zhang, N., Xun, W., Dong, X., Xiao, M., Liu, Z., ... y Zhang, R. (2022). Nitrogen fertilization modulates beneficial rhizosphere interactions through signaling effect of nitric oxide. *Plant Physiology*, 188(2), 1129-1140.

Kechid, M., Desbrosses, G., Rokhsi, W., Varoquaux, F., Djekoun, A., & Touraine, B. (2013). The NRT2.5 and NRT2.6 genes are involved in growth promotion of *Arabidopsis* by the plant growth-promoting rhizobacterium strain *Phyllobacterium brassicacearum* STM196. *New Phytologist*, 198(2), 514–524.

<https://doi.org/10.1111/nph.12158>

Khan, M. S., Zaidi, A., y Wani, P. A. (2021). *Role of plant growth-promoting rhizobacteria in sustainable agriculture: Current perspectives and future prospects*. In *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* (pp. 91–112). Springer.

Ladha, J. K., Pathak, H., Krupnik, T. J., Six, J., y van Kessel, C. (2005). *Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and prospects*. *Advances in Agronomy*, 87, 85–156.

[https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)87003-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)87003-8)

Leal-Almanza, J., Gutiérrez-Coronado, M. A., Castro-Espinoza, L., Lares-Villa, F., Cortes-Jiménez, J. M., y Santos-Villalobos, S. D. L. (2018). Microorganismos promotores de crecimiento vegetal con yeso agrícola en papa (*Solanum tuberosum* L.) bajo casa sombra. *Agrociencia*, 52(8), 1149-1159.

Li, J. W., et al. (2011). Chlorophyll Meter's Estimate of Weight-based Nitrogen Concentration in Rice Leaf is Influenced by Leaf Thickness. *Plant Production Science*, 14(2), 177–183

Liberatore, C. M., Biancucci, M., Ezquer, I., Gregis, V., y Di Marzo, M. (2025). Investigating how reproductive traits in rice respond to abiotic stress. *Journal of experimental botany*, 76(8), 2064–2080.

<https://doi.org/10.1093/jxb/eraf031>

Mamarandi Mossot, J. E., y Ojeda Shagñay, A. G. (2019). *Evaluación de cepas de Bacillus spp. como microorganismos promotores del crecimiento vegetal (PGPR) en brócoli (Brassica oleracea) y lechuga (Lactuca sativa)* (Bachelor's thesis).

- Mantelin, S., & Touraine, B. (2004). Plant growth-promoting bacteria and nitrate availability: Impacts on root development and nitrate uptake. *Journal of Experimental Botany*, 55(394), 27–34.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erh010>
- Mattos, M. L. T., Valgas, R. A., y Martins, J. F. da S. (2022). Evaluation of the agronomic efficiency of *Azospirillum* brasilense strains Ab-V5 and Ab-V6 in flood-irrigated rice. *Agronomy*, 12(12), 3047.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12123047>
- Mboyerwa, P. A., Kibret, K., Mtakwa, P., y Aschalew, A. (2022). Lowering nitrogen rates under the system of rice intensification enhanced rice productivity and nitrogen use efficiency in irrigated lowland rice. *Heliyon*, 8(3), e09140. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09140>
- MINAE-DCC. (2024). *Inventario Nacional de emisiones por fuentes y absorción por sumideros de Gases de Efecto Invernadero. Costa Rica, 1990–2021. Dirección de Cambio Climático, Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). Financiado por el proyecto 4NC/BTR1*. Disponible en: <https://unfccc.int/documents/646083>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2022). *Boletín estadístico agropecuario N.º 33*. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Costa Rica. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/BEA-0033.pdf>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2022). *Informe final NAMA Arroz*.
<https://www.mag.go.cr/asuntos-internacionales/Inf-final-NAMA-Arroz-2022.pdf>
- Murunde, R., Ringo, G., Robinson-Boyer, L., & Xu, X. (2023). Applying beneficial microbes as transplanting dipping and post-transplanting foliar spray led to improved rice productivity. *Technology in Agronomy*, 3, Article 7. <https://doi.org/10.48130/TIA-2023-0007>
- Naher, K., Miwa, H., Okazaki, S., y Yasuda, M. (2018). *Effects of Different Sources of Nitrogen on Endophytic Colonization of Rice Plants by Azospirillum sp. B510*. *Microbes and Environments*, 33(3), 301–308. DOI: 10.1264/jsme2.ME17186.

- Navarrete, E. C., León, E. A., y Arteaga, C. C. (2019). Evaluación de cepas de *Azotobacter* en el incremento de la producción del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) bajo condición de secano en la zona de Baba. *TENDENCIAS E INNOVACIÓN EN AGRONOMÍA*, 11.
- Navarrete, E. N. C., Arteaga, C. A. C., Gaibor, J. D. R., Vasquez, G. E. G., Velez, M. V. U., y Aragoné, D. X. S. (2017). Eficiencia agronómica del arroz INIAP-17 con niveles de fertilización química y biológica en el Litoral Ecuatoriano. *Journal of Science and Research: Revista Ciencia e Investigación*, 2(6), 10-15.
- Noor, A., Ziaf, K., Naveed, M., Khan, K. S., Ghani, M. A., Ahmad, I., Anwar, R., Siddiqui, M. H., Shakeel, A., & Khan, A. I. (2023). L-Tryptophan-dependent auxin-producing plant-growth-promoting bacteria improve seed yield and quality of carrot by altering the umbel order. *Horticulturae*, 9(9), 954.
doi:10.3390/horticulturae9090954
- OCDE y FAO. (2020). *Perspectivas agrícolas 2020-2029. Agricultural Outlook 2020-2029*, OECD Publishing, Paris/FAO, Rome, <https://doi.org/10.1787/1112c23b-en>
- OIEA. (s.f). *Fitomejoramiento. Mejora por inducción de mutaciones*. Recuperado de <https://www.iaea.org/es/temas/mejora-por-induccion-de-mutaciones>
- Okumoto, S. (2003). Uso de inoculante microbiano para la elaboración de abono orgánico. *Taller de abonos orgánicos*, 3, 1-8.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). (2019). *Creciendo a un ritmo menor, se espera que la población mundial alcanzará 9700 millones en 2050 y un máximo de casi 11000 millones alrededor del 2100: Informe de la ONU. Perspectivas de la población mundial*.
https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_PressRelease_ES.pdf
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). (2022). *17 objetivos para transformar nuestro mundo*. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2022). *World Population Prospects 2022: Summary of results*.

Recuperado de datos oficiales de proyección

https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/wpp2022_summary_of_results.pdf

Patricia, B. (2021). *Microorganismos de interés para la agricultura del futuro: agentes de biocontrol y fijadores de nitrógeno*. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/11860>

Peng, S., Buresh, R. J., Huang, J., Yang, J., Zou, Y., Zhong, X., ... y Dobermann, A. (2006). Improving nitrogen fertilization in rice by site-specific N management. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 26(2), 91–98. <https://doi.org/10.1051/agro:2006001>

Peng, S., Garcia, F. V., Laza, R. C., y Cassman, K. G. (1993). Adjustment for Specific Leaf Weight Improves Chlorophyll Meter's Estimate of Rice Leaf Nitrogen Concentration. *Agronomy Journal*, 85(5), 987–990.

Pérez, A., Leyva, D. A. y Gómez, F. C. (2018). Desafíos y propuestas para lograr la seguridad alimentaria hacia el año 2050. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(1), 175-189.

Perrig, D., Boiero, M. L., Masciarelli, O. A., Penna, C., Ruiz, O. A., Cassán, F. D., y Luna, M. V. (2007). Plant-growth-promoting compounds produced by two agronomically important strains of *Azospirillum brasilense*, and implications for inoculant formulation. *Applied microbiology and biotechnology*, 75(5), 1143-1150.

Pii, Y., Aldrighetti, A., Valentinuzzi, F., Mimmo, T., y Cesco, S. (2019). *Azospirillum brasilense* inoculation counteracts the induction of nitrate uptake in maize plants. *Journal of Experimental Botany*, 70(4), 1313–1324.

Poveda, G., y Andrade, C. (2018). Producción sostenible de arroz. *Contribuciones a las ciencias sociales*, (marzo).

- Puente, M. L., García, J. E., Maroniche, G., Argüissain, M. A., Pirchi, M., & Peticari, A. (2013). Plant-growth promotion of Argentinean isolates of *Azospirillum brasilense* on rice (*Oryza sativa*) under controlled and field conditions. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 13(10), 1361–1369.
- Ramírez Matarrita, R. (2021). *Evaluación del efecto del ambiente generado en 4 sistemas productivos sobre el rendimiento y adaptabilidad de 4 cultivares de chile dulce tipo Bell*.
- Rives, N., Acebo, Y., y Hernández, A. (2007). Bacterias promotoras del crecimiento vegetal en el cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.). Perspectivas de su uso en Cuba. *Cultivos tropicales*, 28(2), 29-38.
- Rocha, I., Ma, Y., Souza-Alonso, P., Vosátka, M., Freitas, H., & Oliveira, R. S. (2019). Seed coating: A tool for delivering beneficial microbes to agricultural crops. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1357.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01357>
- Rodríguez, L., Quintero, C., Cuásquer, J., Graterol, E., García, M., Cruz, M. (2022). Comparación morfo-agronómica y molecular de catorce variedades de arroz (*Oryza sativa*) con las líneas que dieron su origen. *Acta Biológica Colombiana*, 27(1), 5-16. <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/actabiolo>
- Rosales Villegas, M. Á. (2020). *La contaminación por nitratos en la agricultura y sus efectos en la salud humana: beneficio de una fertilización en cloruro*.
- Ruiz-Chután, J. A., Berdúo-Sandoval, J. E., Sacbajá, A., Kalousová, M., Lojka, B., Fernández, E., ... y Sánchez-Pérez, A. (2021). Eficiencia de solubilización de fósforo de aislados nativos guatemaltecos de *Pseudomonas fluorescens*. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 8(2), 184-201.
- Sánchez Castañeda, J., y Lorenz, F. U. K. (2017). *Mercado de productos agrícolas ecológicos en Colombia*.
- Sánchez-Rodríguez, A. (2019). *Fertilizantes de nitrógeno, tan imprescindibles como contaminantes. The conversation*. Recuperado de <https://theconversation.com/fertilizantes-de-nitrógeno-tan-imprescindibles-como-contaminantes-122594>

Santoyo G, Urtis-Flores CA, Loeza-Lara PD, Orozco-Mosqueda MDC, Glick BR. Rhizosphere Colonization

Determinants by Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR). *Biology (Basel)*. 2021 May 27;10(6):475.

doi: 10.3390/biology10060475. PMID: 34072072; PMCID: PMC8229920.

Shrestha, J., Chaudhary, A., y Pokhrel, D. (2018) Application of nitrogen fertilizer in maize in Southern Asia: a

review Aplicación de fertilizantes nitrogenados al maíz en Asia meridional: una revisión. *Peruvian Journal of Agronomy*. DOI: <http://dx.doi.org/10.21704/pja.v2i2.1201>

Silva, P. S. T., Garcia, N. S., Galindo, F. S., Arf, O., Nogueira, T. A. R., Jani, A. D., & Cassiolato, A. M. R. (2024).

Azospirillum brasilense inoculation in a maize–Urochloa–rice cropping system promotes soil chemical and biological changes and increases productivity. *Crops*, 4(2), 211–226.

<https://doi.org/10.3390/crops4020016>

Sociedad Española de Agricultura Ecológica/Agroecología [SEAE]. (2019). *Evidencias científicas sobre la*

producción ecológica. Recuperado de [https://www.agroecologia.net/wp-](https://www.agroecologia.net/wp-content/uploads/2019/06/Evidencias-cientificas-produccion-ecologica-vd.pdf)

[content/uploads/2019/06/Evidencias-cientificas-produccion-ecologica-vd.pdf](https://www.agroecologia.net/wp-content/uploads/2019/06/Evidencias-cientificas-produccion-ecologica-vd.pdf)

Steenhoudt, O., y Vanderleyden, J. (2000). *Azospirillum*, a free-living nitrogen-fixing bacterium closely associated

with grasses: genetic, biochemical and ecological aspects. *FEMS Microbiology Reviews*, 24(4), 487–506.

DOI: 10.1111/j.1574-6976.2000.tb00552.x

Takahashi, W. Y., Galvão, C. W., Cassán, F. D., Urrea-Valencia, S., Stremel, A. C., Stets, M. I., Kremer, M. A. S.,

Jesus, E. da C., y Etto, R. M. (2024). Tracking maize colonization and growth promotion by *Azospirillum*

reveals strain-specific behavior and the influence of inoculation method. *Plant Physiology and*

Biochemistry, 215, 108979. doi:10.1016/j.plaphy.2024.108979

Tanya Morocho, M., y Leiva-Mora, M. (2019). Microorganismos eficientes, propiedades funcionales y

aplicaciones agrícolas. *Centro Agrícola*, 46(2), 93-103.

- Tao, Y., Xie, W., Xu, L., Zhang, L., Wang, G., Wang, X., y Shi, C. (2024). The characteristics of soil salinization effects on nitrogen mineralization and nitrification in upland fields. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1369554.
- Timofeeva, A. M., Galyamova, M. R., y Sedykh, S. E. (2023). Plant growth-promoting soil bacteria: nitrogen fixation, phosphate solubilization, siderophore production, and other biological activities. *Plants*, 12(24), 4074.
- Torres, E. A., y Martínez, C. P. (2010). *El mejoramiento del arroz*. En V. M. Degiovanni Beltramo, C. P. Martínez Racines y F. Motta O. (Eds.), *Producción eco-eficiente del arroz en América Latina* (pp. 141-149). Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Recuperado de https://ciat-library.ciat.cgiar.org/articulos_ciat/2010_Libro_Produccion_Ecoeficiente.pdf
- U.S. Environmental Protection Agency. (2025, March 20). *Nitrous oxide emissions*. U.S. EPA.
- Vacheron, J., Desbrosses, G., Bouffaud, M.-L., Touraine, B., Moëgne-Loccoz, Y., Muller, D., Legendre, L., Wisniewski-Dyé, F., & Prigent-Combaret, C. (2013). Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning. *Frontiers in Plant Science*, 4, 356. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00356>
- Vallejo, M., y Blanco, A. (2020). *Lineamientos de la estrategia de NAMA arroz (Nota conceptual)*. Ministerio de Agricultura y Ganadería; CONARROZ. <https://www.magn.mg.go.cr/asuntos-internacionales/Nota-Conceptual-NAMA-Arroz-Version1.1.pdf>
- Vanegas, J., Flórez-Zapata, N., y Uribe-Vélez, D. (2011). Bioprospección de microorganismos promotores de crecimiento vegetal para su aplicación en el cultivo de arroz. *Ecología de Microorganismos Rizosféricos Asociados a Cultivos de Arroz de Tolima y Meta*. Bogotá, D. C: Universidad Nacional de Colombia. pp, 151-178.

- Vázquez, M. M., César, S., Azcón, R., y Barea, J. M. (2020). *Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and other microbial inoculants (PGPR) for sustainable agriculture. In Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity* (pp. 111–129). Springer. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2647-5_6
- Verdenelli, R. A. (2018). *Impacto a largo plazo de la fertilización mineral sobre la estructura de las comunidades microbianas de suelo*. [Tesis doctoral].
- Vignola, R., Poveda, K., Watler, W., Vargas, A., Berrocal, A y Morales, A. (2018). *Prácticas efectivas para la reducción de impactos por eventos climáticos en Costa Rica. Cultivo de arroz*. Recuperado de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/reduccion-impacto-por-eventos-climaticos/Informe-final-Arroz.pdf>
- Vilca Romero, J. C. (2018). *Los fertilizantes químicos y su influencia en la calidad de suelos de cultivos de maíz en el distrito Chingas, provincia de Antonio Raimondi-Ancash, 2017-2018*.
- Villegas-Agüero, L. C. (2016). *Efecto de la aplicación del producto NITROBACTER® dentro de un plan de fertilización nitrogenada sobre el crecimiento y rendimiento de melón dorado (Cucumis melo L.) híbrido 6276 en pilas de canjel, Nandayure, Guanacaste*.
- Wang, X., Feng, J., Ao, G., Qin, W., Han, M., Shen, Y., ... y Zhu, B. (2023). Globally nitrogen addition alters soil microbial community structure, but has minor effects on soil microbial diversity and richness. *Soil Biology and Biochemistry*, 179, 108982.
- Wessén, E., Hallin, S. y Philippot, L. (2010). Differential responses of bacterial and archaeal groups at high taxonomical ranks to soil management. *Soil Biology and Biochemistry*, 42 (10), 1759-1765.
- Wu, G., Chen, X., Zang, Y., Ye, Y., Qian, X., Zhang, W., Zhang, H., Liu, L., Zhang, Z., Wang, Z., Gu, J., y Yang, J. (2024). An optimized strategy of nitrogen-split application based on the leaf positional differences in chlorophyll meter readings. *Journal of Integrative Agriculture*, 23(8), 2605–2617.

- Xiaoming, Xu., Atul, Jain. (2021). *Food production generates more than a third of manmade greenhouse gas emissions – a new framework tells us how much comes from crops, countries and regions. The conversation*. Recuperado de <https://theconversation.com/food-production-generates-more-than-a-third-of-manmade-greenhouse-gas-emissions-a-new-framework-tells-us-how-much-comes-from-crops-countries-and-regions-167623>.
- Xuan, J., He, L., Wen, W., & Feng, Y. (2023). Hydrogenase and nitrogenase: Key catalysts in biohydrogen production. *Molecules*, 28(3), 1392. <https://doi.org/10.3390/molecules28031392>
- Yasuda, M., Dastogeer, K. M. G., Sarkodee-Addo, E., Tokiwa, C., Isawa, T., Shinozaki, S., y Okazaki, S. (2022). Impact of *Azospirillum* sp. B510 on the rhizosphere microbiome of rice under field conditions. *Agronomy*, 12(6), 1367. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061367>
- Zeffa, D. M., Perini, L. J., Silva, M. B., De Sousa, N. V., Scapim, C. A., Oliveira, A. L. M., ... y Goncalves, L. S. A. (2019). *Azospirillum brasilense* promueve aumentos en el crecimiento y la eficiencia en el uso de nitrógeno de los genotipos de maíz. *PLoS ONE*, 14(4), e0215332.
- Zeng, Y., Guo, L., Gao, Y., Cui, L., Wang, M., Huang, L., Jiang, M., Liu, Y., Zhu, Y., Xiang, H., Li, D.-F., & Zheng, Y. (2024). Formation of NifA–PIL complex represses ammonium-sensitive nitrogen fixation in diazotrophic proteobacteria lacking NifL. *Cell Reports*, 43(7), 114476. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2024.114476>
- Zhao, C., Liu, G., Chen, Y., Jiang, Y., Shi, Y., Zhao, L., ... y Huo, Z. (2022). Excessive nitrogen application leads to lower rice yield and grain quality by inhibiting the grain filling of inferior grains. *Agriculture*, 12(7), 962.
- Zhong, Y., Li, H., Li, F., Fu, G., Deng, Q., Zeng, D., y Huang, L. (2025). Nitrogen regulates pollen tube elongation under low-light stress during anthesis to prevent spikelet abortion in rice. *Plant Growth Regulation*, 105(1), 203-213.

Zombado, Arroyo. M. (2016). *Efecto de la aplicación del producto NITROBACTER® dentro de un plan de fertilización nitrogenada sobre el rendimiento y calidad de una mezcla de Pasto Taner (Brachiaria radicans) y Estrella Africana (Cynodon nlemfuensis) en los chiles de Aguas Zarcas*. Instituto tecnológico de Costa Rica.

Anexos

Anexo 1

Análisis químico de suelo base (CIA-UCR)

ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELOS												
Solución Extractora:		pH	cmol(+)/L					%	mg/L			
KCI-Olsen Modificado		H ₂ O	ACIDEZ	Ca	Mg	K	CICE	SA	P	Zn	Cu	Fe Mn
ID USUARIO	ID LAB	5,5	0,5	4	1	0,2	5		10	3	1	10 5
QUIMICO BASE	S-23-08183	6,7	0,10	26,93	13,12	0,65	40,80	0,2	39	3,7	24	92 64

ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELOS						
				mS/cm	%	Relación
				CE	C N	C/N
ID USUARIO	ID LAB			1,5		
QUIMICO BASE	S-23-08183			0,1	2,37 0,22	10,8

Anexo 2

Análisis químico de suelo por tratamiento – 120 días (CIA-UCR)

ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELOS												
Solución Extractora:		pH	cmol(+)/L					%	mg/L			
KCI-Olsen Modificado		H ₂ O	ACIDEZ	Ca	Mg	K	CICE	SA	P	Zn	Cu	Fe Mn
ID USUARIO	ID LAB	5,5	0,5	4	1	0,2	5		10	3	1	10 5
TRATAMIENTO 1 - 120 DIAS	S-24-01220	6,8	0,10	22,70	9,41	0,52	32,73	0,3	39	3,7	27	113 50
TRATAMIENTO 2 - 120 DIAS	S-24-01221	6,8	0,07	22,80	9,45	0,50	32,82	0,2	38	4,2	28	111 52
TRATAMIENTO 3 - 120 DIAS	S-24-01222	6,7	0,10	22,90	9,53	0,50	33,03	0,3	38	4,1	30	117 62
TRATAMIENTO 4 - 120 DIAS	S-24-01223	6,9	0,09	23,57	9,84	0,54	34,04	0,3	38	4,3	29	101 70
TRATAMIENTO 5 - 120 DIAS	S-24-01224	6,8	0,09	21,24	8,77	0,52	30,62	0,3	37	4,0	27	102 61
TRATAMIENTO 6 - 120 DIAS	S-24-01225	6,8	0,10	22,74	9,41	0,52	32,77	0,3	40	4,3	29	116 64
TRATAMIENTO 7 - 120 DIAS	S-24-01226	6,7	0,10	23,19	9,66	0,49	33,44	0,3	38	4,4	27	95 64
TRATAMIENTO 8 - 120 DIAS	S-24-01227	6,8	0,08	23,06	9,56	0,48	33,18	0,2	38	4,6	28	98 65
TRATAMIENTO 9 - 120 DIAS	S-24-01228	6,8	0,09	23,44	9,69	0,49	33,71	0,3	38	5,6	27	113 50
TRATAMIENTO 10 - 120 DIAS	S-24-01229	6,7	0,09	22,00	8,96	0,47	31,52	0,3	39	5,3	28	145 30

ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELOS						
				mS/cm	%	Relación
				CE	C N	C/N
ID USUARIO	ID LAB			1,5		
TRATAMIENTO 1 - 120 DIAS	S-24-01220			0,2	2,05 0,21	9,8
TRATAMIENTO 2 - 120 DIAS	S-24-01221			0,2	2,02 0,20	10,1
TRATAMIENTO 3 - 120 DIAS	S-24-01222			0,2	2,04 0,21	9,7
TRATAMIENTO 4 - 120 DIAS	S-24-01223			0,2	2,07 0,21	9,9
TRATAMIENTO 5 - 120 DIAS	S-24-01224			0,2	2,02 0,21	9,6
TRATAMIENTO 6 - 120 DIAS	S-24-01225			0,2	1,97 0,23	8,6
TRATAMIENTO 7 - 120 DIAS	S-24-01226			0,2	1,91 0,21	9,1
TRATAMIENTO 8 - 120 DIAS	S-24-01227			0,2	1,88 0,21	9,0
TRATAMIENTO 9 - 120 DIAS	S-24-01228			0,2	1,84 0,20	9,2
TRATAMIENTO 10 - 120 DIAS	S-24-01229			0,2	1,87 0,20	9,4

Anexo 3

Análisis químico foliar – 35 ddt (N% y C%) (CIA-UCR)

ANÁLISIS QUÍMICO FOLIAR			
ID USUARIO	IDLAB	% masa	
		N*	C**
TRATAMIENTO 1 - 35 DIAS	P-23-07199	3,01	40,31
TRATAMIENTO 2 - 35 DIAS	P-23-07200	3,53	41,64
TRATAMIENTO 3 - 35 DIAS	P-23-07201	3,05	40,52
TRATAMIENTO 4 - 35 DIAS	P-23-07202	2,98	40,51
TRATAMIENTO 5 - 35 DIAS	P-23-07203	3,35	41,24
TRATAMIENTO 6 - 35 DIAS	P-23-07204	3,11	40,30
TRATAMIENTO 7 - 35 DIAS	P-23-07205	3,36	40,04
TRATAMIENTO 8 - 35 DIAS	P-23-07206	3,23	40,34
TRATAMIENTO 9 - 35 DIAS	P-23-07207	3,54	40,82
TRATAMIENTO 10 - 35 DIAS	P-23-07208	3,02	40,05
-----ÚLTIMA LÍNEA-----			

Anexo 4

Análisis químico foliar – 70 ddt (N% y C%) (CIA-UCR)

ANÁLISIS QUÍMICO FOLIAR			
ID USUARIO	IDLAB	% masa	
		N*	C**
TRATAMIENTO 1 - 70 DIAS	P-24-00410	2,01	35,31
TRATAMIENTO 2 - 70 DIAS	P-24-00411	2,28	35,12
TRATAMIENTO 3 - 70 DIAS	P-24-00412	1,81	34,52
TRATAMIENTO 4 - 70 DIAS	P-24-00413	1,82	34,97
TRATAMIENTO 5 - 70 DIAS	P-24-00414	2,39	35,93
TRATAMIENTO 6 - 70 DIAS	P-24-00415	1,97	34,02
TRATAMIENTO 7 - 70 DIAS	P-24-00416	2,08	34,65
TRATAMIENTO 8 - 70 DIAS	P-24-00417	2,09	34,64
TRATAMIENTO 9 - 70 DIAS	P-24-00418	1,94	34,81
TRATAMIENTO 10 - 70 DIAS	P-24-00419	2,08	34,23
-----ÚLTIMA LÍNEA-----			

Anexo 5

Calidad del inoculante Nitrobacter® (UFC/mL; CIA-UCR)



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

CIA Centro de
Investigaciones
Agronómicas

Reporte de Resultados de Ensayo

Nº Solicitud: 87494

Fecha de emisión: 14/09/2023

Fecha de recepción: 25/08/2023

Nombre: UNIVERSIDAD NACIONAL

Correo: jhonson.mora.mata@una.cr

Subcliente: TFG JOHNSON MORA MATA

Teléfono: 8618-8111

Responsable: JOHNSON MORA MATA

Cultivo: SIN CULTIVO

Ubicación: GUANACASTE, CAÑAS

Resultados del ensayo

ID. Lab.	ID. Cliente	<i>Clostridium</i> UFC/ml	<i>Azospirillum</i> UFC/ml	<i>Azotobacter</i> UFC/ml
MI-833-23	NITROBACTER	<1,0X10 ²	<1,0X10 ²	2,6X10 ³

Lideth Unbe

Dra. Lideth Unbe Lozío

M.Q.C. cod 664

Coordinadora

Laboratorio de Microbiología Agrícola

Anexo 6

Comportamiento/recuento de fijadores de N (UFC/g) – base, 35 ddt y 120 ddt (CIA-UCR)



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

CIA Centro de
Investigaciones
Agronómicas

Reporte de Resultados de Ensayo

N° Solicitud: 87557

Fecha de emisión: 14/09/2023

Fecha de recepción: 31/08/2023

Nombre: UNIVERSIDAD NACIONAL
Correo: jhonson.mora.mata@una.cr
Subcliente: TFG JOHNSON MORA MATA
Teléfono: 8618-8111
Responsable: JOHNSON MORA MATA
Cultivo: SIN CULTIVO
Ubicación: GUANACASTE, CAÑAS

Resultados del ensayo

ID. Lab.	ID. Cliente	Fijadores de N UFC/g
MI-847-23	ANALISIS BASE	1,4X10 ⁷



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

CIA Centro de
Investigaciones
Agronómicas

Reporte de Resultados de Ensayo

N° Solicitud: 88814

Fecha de emisión: 14/12/2023

Fecha de recepción: 30/11/2023

Nombre: UNIVERSIDAD NACIONAL
Correo: jhonson.mora.mata@una.cr
Subcliente: TFG JOHNSON MORA MATA
Teléfono: 8618-8111
Responsable: JOHNSON MORA MATA
Cultivo: ARROZ
Ubicación: GUANACASTE, CAÑAS

Resultados del ensayo

ID. Lab.	ID. Cliente	Fijadores de N UFC/g
MI-1254-23	TRATAMIENTO 1 - 35 DIAS	5,0X10 ⁶
MI-1255-23	TRATAMIENTO 2 - 35 DIAS	4,6X10 ⁶
MI-1256-23	TRATAMIENTO 3 - 35 DIAS	6,1X10 ⁶
MI-1257-23	TRATAMIENTO 4 - 35 DIAS	5,7X10 ⁶
MI-1258-23	TRATAMIENTO 5 - 35 DIAS	5,1X10 ⁶
MI-1259-23	TRATAMIENTO 6 - 35 DIAS	4,9X10 ⁶
MI-1260-23	TRATAMIENTO 7 - 35 DIAS	5,6X10 ⁶
MI-1261-23	TRATAMIENTO 8 - 35 DIAS	5,8X10 ⁶
MI-1262-23	TRATAMIENTO 9 - 35 DIAS	5,1X10 ⁶
MI-1263-23	TRATAMIENTO 10 - 35 DIAS	3,8X10 ⁶



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

CIA Centro de
Investigaciones
Agronómicas

Reporte de Resultados de Ensayo

N° Solicitud: 89340

Fecha de emisión: 26/02/2024

Fecha de recepción: 12/02/2024

Nombre: UNIVERSIDAD NACIONAL
Correo: jhonson.mora.mata@una.cr
Subcliente: TFG JOHNSON MORA MATA
Teléfono: 8618-8111
Responsable: JOHNSON MORA MATA
Cultivo: ARROZ
Ubicación: GUANACASTE, CAÑAS

Resultados del ensayo

ID. Lab.	ID. Cliente	Fijadores de N UFC/g
MI-85-24	TRATAMIENTO 1 - 120 DIAS	2,4X10 ⁶
MI-86-24	TRATAMIENTO 2 - 120 DIAS	1,1X10 ⁷
MI-87-24	TRATAMIENTO 3 - 120 DIAS	9,5X10 ⁶
MI-88-24	TRATAMIENTO 4 - 120 DIAS	4,2X10 ⁶
MI-89-24	TRATAMIENTO 5 - 120 DIAS	2,1X10 ⁶
MI-90-24	TRATAMIENTO 6 - 120 DIAS	3,9X10 ⁶
MI-91-24	91 TRATAMIENTO 7 - 120 DIAS	8,5X10 ⁶
MI-92-24	TRATAMIENTO 8 - 120 DIAS	4,7X10 ⁶
MI-93-24	TRATAMIENTO 9 - 120 DIAS	2,5X10 ⁶
MI-94-24	TRATAMIENTO 10 - 120 DIAS	6,6X10 ⁶

Anexo 7

ANOVA / modelo: Altura

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	120	6764,50	<0,0001
Tratamiento	9	30	1,82	0,1054

Pruebas de hipótesis marginales

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Tratamiento	9	30	1,82	0,1054

Altura.cm - Medias ajustadas y errores estándares para Tratamiento

LSD Fisher (Alfa=0,1)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Tratamiento	Medias	E.E.	
5	97,44	3,51	A
10	96,81	3,51	A
2	95,13	3,51	A B
8	94,19	3,51	A B
7	93,69	3,51	A B
1	90,00	3,51	A B C
9	89,50	3,51	A B C
6	87,06	3,51	B C
4	85,13	3,51	C
3	84,63	3,51	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,10$)

Anexo 8

ANOVA / modelo mixto: Índice de clorofila (SPAD) 35 y 84 ddt

Pruebas de hipótesis marginales

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Tratamiento	9	30	4,33	0,0011
ddt	1	270	8,59	0,0037
Tratamiento:ddt	9	270	2,40	0,0126

Índice de clorofila - Medias ajustadas y errores estándares para Tratamiento*ddt

DGC (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Tratamiento	ddt	Medias	E.E.	
2	84 ddt	45,95	1,26	A
8	84 ddt	44,16	1,26	A
5	84 ddt	43,77	1,26	A
2	35 ddt	43,33	1,26	A
9	35 ddt	42,84	1,26	A
10	35 ddt	42,49	1,26	A
7	84 ddt	42,44	1,26	A
5	35 ddt	42,39	1,26	A
10	84 ddt	42,23	1,26	A
6	84 ddt	41,94	1,26	A
9	84 ddt	41,03	1,26	B
3	84 ddt	40,58	1,26	B
7	35 ddt	40,39	1,26	B
1	35 ddt	39,43	1,26	B
3	35 ddt	38,84	1,26	B
1	84 ddt	38,57	1,26	B
4	35 ddt	38,28	1,26	B
8	35 ddt	37,93	1,26	B
4	84 ddt	37,75	1,26	B
6	35 ddt	37,56	1,26	B

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

Anexo 9

ANOVA / modelo: Materia seca

Resultados para el modelo: `mlm.modelo.002_Materia.Seca_REML`
 Variable dependiente: Materia Seca

Medidas de ajuste del modelo

n	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2 0	R2 1
20	126,42	130,05	-51,21	10,06	0,50	1,00

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	10	401,51	<0,0001
Tratamiento	9	10	1,11	0,4332

Pruebas de hipótesis marginales

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Tratamiento	9	10	1,11	0,4332

Anexo 10

Correlación SPAD vs N foliar (%) (35 y 84 ddt)

Momento de evaluación	N	r (Pearson)	IC 95% de r	p-valor	Ajuste lineal (N% = a + b·SPAD)	R ²
35 ddt	10	0.645	[0.025, 0.906]	0.044	N% = 0.709 + 0.0622·SPAD	0.415
84 ddt	10	0.771	[0.275, 0.943]	0.009	N% = -0.320 + 0.0566·SPAD	0.595

Anexo 11

ANOVA / modelo: Esterilidad

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	30	258,38	<0,0001
Tratamiento	9	30	1,96	0,0802

Pruebas de hipótesis marginales

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Tratamiento	9	30	1,96	0,0802

Esterilidad - Medias ajustadas y errores estándares para Tratamiento

LSD Fisher (Alfa=0,1)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Tratamiento	Medias	E.E.			
2	17,00	2,51	A		
6	16,17	2,51	A		
9	14,42	2,51	A		
10	14,33	2,51	A		
5	13,92	2,51	A		
7	13,67	2,51	A		
8	12,33	2,51	A	B	
3	12,25	2,51	A	B	
4	7,25	2,51	B	B	C
1	6,17	2,51			C

Anexo 12

ANOVA / modelo: Peso de 100 granos

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	30	21508,80	<0,0001
Tratamiento	9	30	2,44	0,0322

Pruebas de hipótesis marginales

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Tratamiento	9	30	2,44	0,0322

Peso.100.granos.g - Medias ajustadas y errores estándares para

Tratamiento

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Tratamiento	Medias	E.E.				
1	2,59	0,05	A			
3	2,56	0,05	A	B		
4	2,53	0,05	A	B	C	
8	2,50	0,05	A	B	C	
5	2,45	0,05	A	B	C	D
2	2,44	0,05	A	B	C	D
10	2,43	0,05		B	C	D
9	2,39	0,05			C	D
7	2,38	0,05			C	D
6	2,34	0,05				D

Anexo 13

ANOVA / modelo: Rendimiento

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	30	1880,18	<0,0001
Tratamiento	9	30	3,58	0,0039

Pruebas de hipótesis marginales

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Tratamiento	9	30	3,58	0,0039

Rendimiento_ha.t - Medias ajustadas y errores estándares para Tratamiento

LSD Fisher (Alfa=0,1)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Tratamiento	Medias	E.E.							
5	4,07	0,25	A						
10	3,94	0,25	A	B					
2	3,79	0,25	A	B	C				
8	3,57	0,25	A	B	C	D			
9	3,38	0,25		B	C	D	E		
6	3,24	0,25			C	D	E	F	
7	3,12	0,25				D	E	F	
1	3,06	0,25					D	E	F
3	2,84	0,25						E	F
4	2,70	0,25							F

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,10$)