

Efecto del biofertilizante Humina en componentes del rendimiento agrícola, cultivar IACuba-41 (*Oryza sativa* L.) en un Vertisol, Río Cauto, Granma

Effect of the biofertilizer Humina on yield components of cultivar IACuba-41 (*Oryza sativa* L.) in a Vertisol in Río Cauto, Granma

Lisandra Cuervo Bárzaga⁽¹⁾

Sergio F. Rodríguez Rodríguez⁽²⁾

Wilson Geobel Ceiro Catasú⁽³⁾

María de los Ángeles Jiménez Pizarro⁽⁴⁾

Sahily Cano Llorente⁽⁵⁾

Gerardo Cueto Aldana⁽⁶⁾

Arisdalia Alarcón Alba⁽⁷⁾

(1) Centro Universitario Municipal de Río Cauto. Universidad de Granma. Cuba. lisandracuervo6@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4475-2288>

(2) Universidad de Granma. Cuba. sfrodriiguez1964@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2923-5092>

(3) Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, Unidad Guerrero Negro, Independencia y Paseo Eucalipto s/n, Guerrero Negro, 23940, Baja California Sur, México. wceiroc@cibnor.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2065-2279>

(4) Universidad de Granma. Cuba. mjimenezp@udg.co.cu. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1548-4135>

(5) Universidad de Granma. Cuba. sahilycanollorete@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1572-9179>

(6) Estación Territorial de Investigaciones de Granos. Jucarito. Granma. Cuba. gcueto142@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4103-541X>

(7) Centro Universitario Municipal. Río Cauto. Granma. Cuba. alarconalbaarisdalia@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4085-2048>

Resumen

El empleo de productos en la agricultura ha experimentado un notable incremento debido a los beneficios que aporta, tales como el aumento del rendimiento y una gestión ambiental sostenible del agroecosistema. El estudio de caso se llevó a cabo en la Cooperativa de Créditos y Servicios Enrique Moreno, ubicada en la zona de Las Galaxias, en Río Cauto, Granma, Cuba, durante el período comprendido entre enero y abril de 2023. El objetivo del presente estudio fue evaluar el cultivar IACuba-41 bajo dos tratamientos: aplicación foliar de Humina (4 L ha⁻¹) y control absoluto. El bioproducto en cuestión fue aplicado en cuatro ocasiones, desde los 15 días posteriores a la germinación hasta 10 días antes de la floración. En el presente estudio, se procedió a la cuantificación de granos vanos y llenos por panícula, así como a la determinación de la densidad de panículas, la masa de 1000 granos y el rendimiento (t ha⁻¹). El análisis estadístico realizado incluyó la prueba t de Student para la comparación de medias y la regresión lineal múltiple para determinar las relaciones entre las variables predictoras y el rendimiento. La implementación de Humina resultó en un incremento notable en todas las variables evaluadas en comparación con el grupo de control. Sin embargo, la regresión lineal múltiple no detectó significancia estadística en la relación lineal entre componentes y rendimiento para cada tratamiento por separado. Los granos llenos por panícula ejercieron la mayor influencia sobre el rendimiento agrícola. El bioproducto en cuestión demostró una eficacia notable en la optimización del rendimiento, según se evidencia en los resultados obtenidos en IACuba-41. La implementación de este sistema, en combinación con la provisión de asesoramiento técnico especializado, podría constituir una alternativa viable y sostenible para la producción de arroz con bajos insumos en las regiones arroceras del oriente de Cuba.

Palabras claves: Biofertilizante; cultivo; producción; rendimiento; sostenibilidad.

Abstract

The use of agricultural products has increased significantly due to the benefits they provide, such as higher yields and sustainable environmental management of the agroecosystem. The case study was conducted at the Enrique Moreno Credit and Services Cooperative, located in the Las Galaxias

area of Río Cauto, Granma, Cuba, during the period from January to April 2023. The objective of this study was to evaluate the IACuba-41 cultivar under two treatments: foliar application of Humina (4 L ha⁻¹) and a complete control. The bioproduct in question was applied four times, starting 15 days after germination and continuing until 10 days before flowering. In this study, we quantified the number of empty and filled grains per panicle and determined panicle density, 1,000-grain weight, and yield (t ha⁻¹). The statistical analysis included Student's t-test for comparing means and multiple linear regression to determine the relationships between the predictor variables and yield. The application of Humina resulted in a notable increase in all evaluated variables compared to the control group. However, multiple linear regression did not detect statistical significance in the linear relationship between components and yield for each treatment separately. Full grains per panicle had the greatest influence on crop yield. The bioproduct in question demonstrated remarkable efficacy in optimizing yield, as evidenced by the results obtained at IACuba-41. The implementation of this system, in combination with the provision of specialized technical advice, could constitute a viable and sustainable alternative for low-input rice production in the rice-growing regions of eastern Cuba.

Key words: Biofertilizer; crop; production; yield; sustainability.

Introducción

El arroz (*Oryza sativa* L.) constituye el principal cultivo de consumo humano a nivel mundial, sirviendo como base alimentaria para más de la mitad de la población global y garantizando la seguridad alimentaria de más de 3 mil millones de personas en regiones tropicales y subtropicales (Muthayya et al., 2014). Este cereal proporciona aproximadamente el 20 % del suministro calórico mundial, representando la fuente primaria de energía dietética para la mayoría de la población en Asia, África y América Latina (Fukagawa y Ziska, 2019). Dada su preeminencia en el consumo global y su intensivo uso de recursos hídricos y edáficos, el desarrollo de sistemas de producción sostenibles que optimicen el rendimiento sin comprometer los ecosistemas edáficos constituye una imperiosa prioridad agrícola frente al crecimiento demográfico y los desafíos climáticos actuales.

El arroz constituye el sustento calórico principal para 3 500 millones de personas, con producción concentrada en Asia (Hashim et al., 2024). Su cultivo en condiciones inundadas genera una rizósfera particular donde la integración de biofertilizantes mitiga el impacto ambiental de la agricultura intensiva.

La agricultura sostenible requiere la reducción de agroquímicos mediante alternativas biológicas que mantengan la productividad. Una alternativa es el empleo de humus de lombriz, lo cual constituye un biofertilizante de alto valor agronómico por su riqueza en ácidos húmicos y sustancias bioactivas que mejoran la estructura del suelo y el desarrollo radicular. Su aplicación en sistemas de cultivo permite aumentar la disponibilidad de nutrientes esenciales, potenciando la eficiencia fotosintética y la tolerancia a estrés abiótico en plantas (Singh et al., 2025). Hernández et al. (2018) demostraron que los ácidos húmicos derivados de vermicompost estimulan la actividad enzimática y protegen la integridad celular en cultivares de arroz, incrementando significativamente el rendimiento bajo condiciones de estrés hídrico. Esta alternativa orgánica en combinación con el empleo de microorganismos benéficos representa una estrategia sostenible para reducir el uso de agroquímicos sintéticos.

Entre los microorganismos benéficos están las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB), particularmente *Azotobacter* y *Pseudomonas*, las que mejoran la nutrición y salud de Poaceae como el arroz, mediante fijación de nitrógeno, solubilización de fosfatos y biocontrol (Glick, 2012; Vejan et al., 2016). La coinoculación de estas especies genera efectos sinérgicos que incrementan el número de macollos, panículas y contenido de clorofila, aunque su eficacia depende de factores edafoclimáticos y de compatibilidad genotipo-cepa (Beneduzi et al., 2012; Efthimiadou et al., 2020).

Otras especies de microorganismos benéficos como el género *Trichoderma* (*T. harzianum*, *T. viride*, *T. reesei*, *T. asperellum*) complementa la acción de las PGPB mediante control biológico por competencia, antibiosis, micoparasitismo e inducción de resistencia sistémica (Benítez et al., 2004; Harman et al., 2004;). Además, actúa como bioestimulante al mejorar la germinación, desarrollo radicular y absorción de nutrientes (Stewart y Hill, 2014).

La combinación de humus líquido de lombriz y microorganismos benéficos en la base del bioproducto Humina que se desarrolla por productores de arroz en la provincia de Granma, Cuba.

En tal sentido el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de una dosis única del bioproducto Humina (PGPB + *Trichoderma*) en componentes del rendimiento del cultivar IACuba-41 en un Vertisol de Río Cauto, Granma, Cuba.

Materiales y métodos

La investigación se desarrolló en la CCS Enrique Moreno del municipio Rio Cauto, Provincia de Granma de enero a abril del 2023. En el bloque de producción arrocerá dos de la zona de las Galaxias con un área total de 13,42 ha dedicadas al cultivo del arroz. Del área sembrada de arroz del cultivar IACuba-41 en enero de 2023 se seleccionó una hectárea, en una de las dos medias hectáreas sembradas se aplicó el bioproducto en formulación líquida Humina, que contiene humus líquido de lombriz, las bacterias *Azotobacter chroococum* y *Pseudomonas fluorescens*, y el hongo *Trichoderma harzianum*, cepa A-34. Se realizaron cuatro aplicaciones distribuidas desde los 15 días de germinado el arroz hasta 10 días antes de la floración, con una dosis de 4 litros por hectárea en aplicación foliar con mochilas. La otra media hectárea no se aplicó producto alguno y se dejó como tratamiento control.

Las labores culturales desde la siembra hasta la cosecha se realizaron de acuerdo al instructivo técnico para el cultivo del arroz en Cuba en condiciones de suelo inundado (IIG-CUBA, 2020), en un suelo Vertisol (Hernández-Jiménez et al., 2019).

En el momento previo a la cosecha (siete días antes de la cosecha) se evaluaron las siguientes variables:

Granos llenos por panícula: Para evaluar esta variable se tomaron 10 panículas al azar dentro del área útil de cada subparcela, en las que se contabilizó el número de granos llenos por cada una, y posteriormente se halló el promedio para seis repeticiones.

Granos vanos por panícula: Para evaluar esta variable se tomaron 10 panículas al azar dentro del área útil de cada subparcela, en las que se contabilizó el número de granos vanos por cada una, y posteriormente se halló el promedio para seis repeticiones.

Panículas por metro cuadrado: Al momento de la cosecha se registró el número de panículas cosechadas por metro cuadrado de los seis puntos que se muestrearon al azar.

Masa de 1000 granos (g): De los seis puntos que se muestrearon al azar se tomó una muestra de 2 000 g al momento de la cosecha, las que se mezclaron homogéneamente. De ellas se seleccionaron 1 000 granos llenos, los que se pesaron en una balanza analítica marca Sartorio.

Rendimiento agrícola ($t\ ha^{-1}$): El rendimiento se determinó por el peso de los granos, provenientes de cada parcela experimental, ajustado al 14 % de humedad y transformados a kilogramos por hectárea, mediante la siguiente fórmula:

$$Pu=Pa (100 x Pu)/100-Hd$$

Dónde:

Pu= peso uniformado, Pa= peso actual, Ha=humedad actual y Hd=humedad deseada

Los datos de todas las variables evaluadas se comprobaron si se ajustaban o no a una distribución normal a través de la prueba de Shapiro-Wilk modificada. Los resultados arrojaron un valor de p en todos los casos mayor de 0,05 e indica que se ajustan a una distribución normal por lo que para la determinación de la existencia o no de diferencias significativas entre ambos tratamientos (con Humina y sin Humina) se utilizó la prueba t de student con el ajuste de Satterthwaite para el caso de que las varianzas de ambos tratamientos fueran heterogéneas.

Se realizó un análisis de regresión múltiple para evaluar la relación entre el rendimiento agrícola y cuatro componentes del rendimiento (granos llenos por panícula, granos vanos por panícula, panículas por metro, y masade 1000 granos) en dos tratamientos: con Humina y sin Humina. Los estadísticos del análisis de regresión lineal múltiple determinaron fueron el coeficiente de determinación (R^2) normal y ajustado, raíz del error cuadrático medio (RECM), y los valores de F y la probabilidad p. Se incluyó además el modelo de la regresión lineal múltiple para cada tratamiento.

El procesamiento estadístico se realizó por el paquete estadístico Infostat 2020 (Di Rienzo et al., 2020), con modelación para la regresión lineal múltiple por Python.

Resultados y discusión

Granos llenos por panícula

La aplicación de Humina incrementó significativamente el número de granos llenos por panícula en IACuba-41 ($p < 0,001$; Figura 1). El tratamiento con bioproducto alcanzó 130 granos frente a 95 del control.

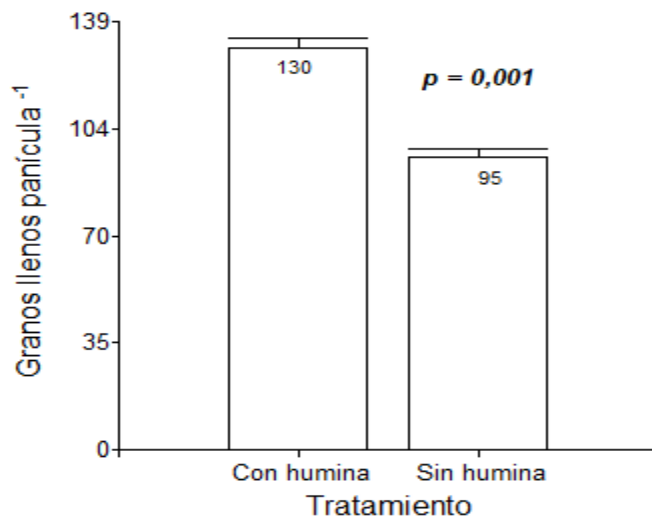


Figura 1. Valores medios y su error estándar del número de granos llenos por panícula para los tratamientos con Humina y sin Humina en el cultivar IACuba-41. Valores de p menores de 0,05 indican diferencias significativas en la prueba t de *student*.

La prueba t de Student empleada para comparar dos grupos independientes contrasta con los análisis de varianza utilizados por Chen et al. (2025) y Lakra et al. (2025), quienes evaluaron múltiples tratamientos combinados. Hernández et al. (2018) aplicaron un diseño trifactorial con comparación de medias de Tukey en cultivares cubanos. Aunque los diseños difieren en complejidad, todos validan la significancia de los efectos de los ácidos húmicos.

El incremento del 36,8 % en granos llenos por panícula en IACuba-41 supera los rangos reportados por Bera et al. (2024) para cultivares de ciclo corto (20-25 %) y los efectos globales de enmiendas húmicas sobre rendimiento (12 %), eficiencia de uso de nitrógeno (27 %) y su absorción (17 %) documentados por Ma et al. (2024). Esta magnitud sugiere una respuesta diferencial particular de este genotipo cubano.

Los mecanismos fisiológicos incluyen la activación de vías metabólicas que mejoran la eficiencia fotosintética y reducen el estrés oxidativo durante la fase reproductiva (De Moura et al., 2023). Estos procesos optimizan la permeabilidad de membranas y el transporte de nutrientes, lo cual incrementa el llenado de granos. Zheng et al. (2022) atribuyen efectos similares a la optimización del uso de la radiación.

La plasticidad fenotípica de IACuba-41, previamente documentada por Frontela-Zambrana et al. (2025), permite maximizar la respuesta a intervenciones de manejo como los bioestimulantes. Esta

característica, junto con la adaptación del cultivar a condiciones tropicales específicas, explica la sensibilidad superior a los ácidos húmicos en comparación con otros genotipos.

Granos vanos por panícula

El efecto de la Humina redujo significativamente el número de granos vanos por panícula en IACuba-41 ($p < 0,001$; Figura 2). El tratamiento con bioproducto alcanzó 17,8 granos vanos frente a 23,0 del control, lo cual representa una disminución del 22,6 %. Esta magnitud del efecto evidencia la efectividad del bioestimulante en la reducción de la esterilidad de panículas.

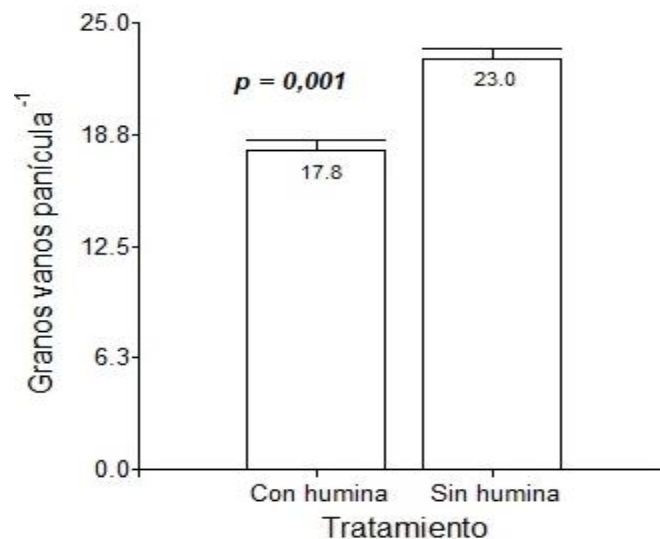


Figura 2. Valores medios y su error estándar del número de granos vanos por panícula para los tratamientos con Humina y sin Humina en el cultivar IACuba-41. Valores de p menores de 0,05 indican diferencias significativas en la prueba t de *student*.

La reducción del 22,6 % en granos vanos por panícula observada en IACuba-41 resulta comparable a la reportada por Saha et al. (2013), quienes documentaron una disminución del 24,8 % (de 9,11 a 6,85) mediante aplicaciones de ácido húmico. Estudios previos reportan incrementos del 15-25 % en granos llenos (Lakra et al., 2025; Bera et al., 2024), aunque con variabilidad genética y ambiental significativa. La magnitud del efecto en IACuba-41 supera los incrementos globales del 12 % en rendimiento reportados en meta-análisis recientes (Ma et al., 2024).

Esta mejora en la eficiencia reproductiva se atribuye a la activación de vías metabólicas que optimizan la translocación de asimilatos durante el llenado de granos (De Moura et al., 2023). Puteh et al. (2014) demuestran que la esterilidad de granos responde principalmente a la limitación del sumidero (*sink limitation*) por partición inadecuada de asimilados entre granos en competencia,

más que a la restricción en la producción de biomasa (*source limitation*). Los ácidos húmicos mejoran la absorción y transporte de nutrientes, estimulan la actividad hormonal tipo-auxina y aumentan la permeabilidad celular (Ahmad et al., 2008), mecanismos que reducen el estrés oxidativo reproductivo.

La Humina en IACuba-41 optimiza la eficiencia reproductiva bajo condiciones subóptimas mediante una acción mimética con ácido abscísico, la cual mejora el crecimiento radical y la protección celular (Hernández et al., 2018). Esta estrategia resulta particularmente efectiva en cultivares tropicales, donde la reducción de la esterilidad de panículas constituye un factor determinante para la productividad.

Panículas por metro cuadrado

La densidad de panículas por metro cuadrado no difirió significativamente entre tratamientos ($p = 0,07$; Figura 3). El tratamiento con Humina alcanzó 284 panículas m^{-2} frente a 275 del control. Aunque el valor p se sitúa cerca del umbral de significancia ($\alpha = 0,05$), la probabilidad de que esta diferencia responda al azar (7 %) excede el criterio convencional para rechazar la hipótesis nula.

La densidad de panículas por metro cuadrado no mostró diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0,05$), aunque se observó una tendencia al incremento del 3,3 % (284 vs 275 panículas m^{-2}). Frontela-Zambrana et al. (2025) identificaron previamente este componente como el más asociado al rendimiento en IACuba-41, aunque también como el más variable y limitante.

La literatura reporta respuestas contrastantes. Meta-análisis recientes documentan aumentos significativos en densidad de panículas con ácidos húmicos (Chen et al., 2025), mientras que otros estudios no detectan efectos significativos en parámetros estructurales (Joneer y Sam, 2022; Oh y Cho, 2025). Esta variabilidad responde a diferencias genéticas, ambientales y de manejo (Bera et al., 2024).

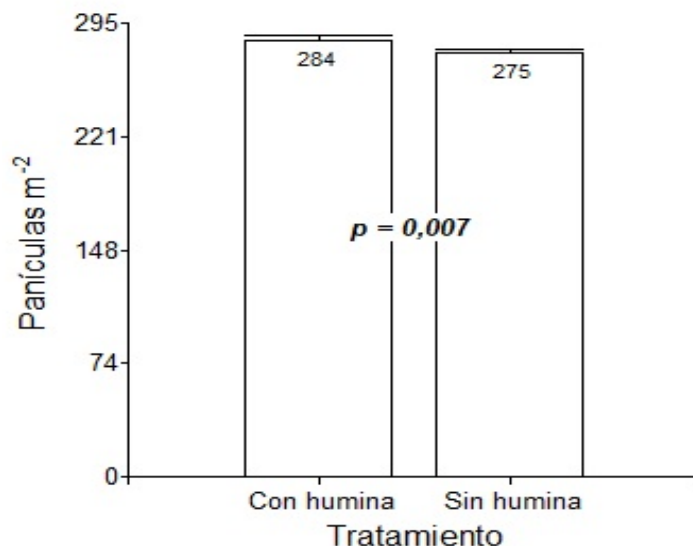


Figura 3. Valores medios y su error estándar del número de panículas por metro cuadrado para los tratamientos con Humina y sin Humina en el cultivar IACuba-41. Valores de p menores de 0,05 indican diferencias significativas en la prueba t de *student*.

La limitada respuesta estructural se explica por la temporalidad del desarrollo. La formación de panículas se establece durante fases vegetativas tempranas (Bera et al., 2024), mientras que las sustancias húmicas actúan principalmente durante etapas reproductivas y de llenado de grano (De Moura et al., 2023).

La estabilidad en densidad de panículas, combinada con mejoras en componentes reproductivos, representa una ventaja adaptativa. Cultivares que mantienen estructura poblacional constante mientras optimizan eficiencia reproductiva muestran mayor estabilidad productiva bajo condiciones variables (El-Aty et al., 2024). Esta característica resulta valiosa en sistemas tropicales donde la variabilidad ambiental afecta la formación temprana de panículas.

Masa de 1000 granos

La masa de 1000 granos presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0,01$; Figura 4). El tratamiento con Humina alcanzó una media de 20,1 g frente a 18,4 g del control, lo cual representa un incremento del 9,2 %. Esta magnitud del efecto evidencia la efectividad del bioproducto en la mejora de la calidad del grano.

Resultados análogos reportan incrementos del 10,3 % (18,28 a 20,16 g; $p < 0,01$) en arroz BRRI dhan39 mediante aplicaciones de ácido húmico (Saha et al., 2013). La optimización de procesos

fisiológicos durante la fase reproductiva explica dichas mejoras (Zheng et al., 2022), mecanismo que subyace al efecto registrado en IACuba-41.

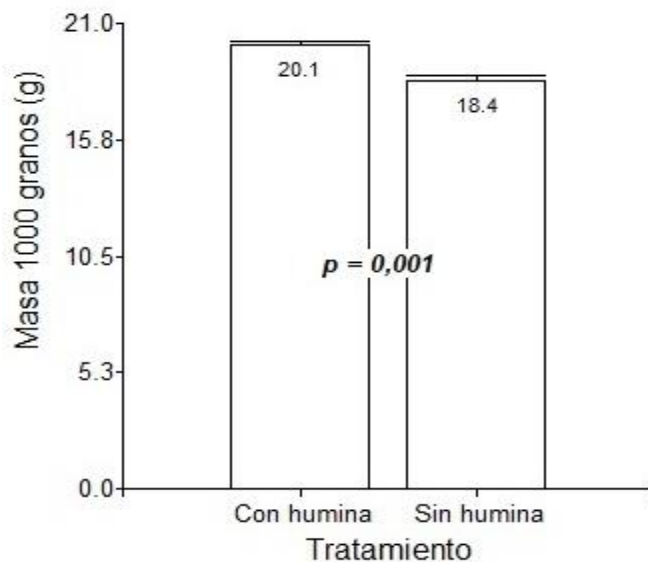


Figura 4. Valores medios y su error estándar de la masa de 1000 granos (g) para los tratamientos con Humina y sin Humina en el cultivar IACuba-41. Valores de p menores de 0,05 indican diferencias significativas en la prueba t de *student*.

El incremento del 9,2 % en peso de 1000 granos supera los rangos reportados en meta-análisis recientes (5-12 %; Chen et al., 2025) y estudios foliares previos. Dicha variabilidad refleja la dependencia de factores genéticos, ambientales y de manejo, donde IACuba-41 demuestra sensibilidad particular a estímulos bioactivos (Bera et al., 2024).

Los mecanismos metabólicos subyacentes incluyen la activación de vías relacionadas con el desarrollo reproductivo y el transporte de asimilatos durante el llenado de granos. Estudios con espectroscopía de resonancia magnética nuclear detectan incrementos significativos en aminoácidos de cadena ramificada, ácidos orgánicos del ciclo de Krebs y azúcares fosforilados, metabolitos que regulan la señalización hormonal y el balance redox fotosintético (De Moura et al., 2023).

La mejora en eficiencia reproductiva bajo condiciones subóptimas encuentra respaldo en investigaciones sobre regulación radical. Ácidos húmicos derivados de vermicompost estimulan la actividad de peroxidasas y el contenido de proteínas solubles totales, efectos que correlacionan con mayor crecimiento radicular y una acción mimética con ácido abscísico (Hernández et al., 2018). Estos procesos explican la optimización del llenado de granos observada en IACuba-41.

Desde la perspectiva industrial, el incremento en peso de 1000 granos mejora sustancialmente el rendimiento de molienda y reduce el porcentaje de granos quebrados. Aunque estudios globales reportan incrementos medios del 12 % en rendimiento y del 27 % en eficiencia de uso de nitrógeno con enmiendas húmicas (Ma et al., 2024), la respuesta específica en calidad de grano de IACuba-41 resulta superior a los umbrales típicos (5-10 %) que generan beneficios económicos tangibles en la cadena productiva.

La evidencia disponible indica que la aplicación de Humina constituye una estrategia efectiva para mejorar la calidad de grano en este cultivar. La variabilidad genotípica documentada subraya la necesidad de estudios específicos por cultivar y ambiente, donde IACuba-41 demuestra potencial excepcional para maximizar beneficios de bioproductos húmicos en sistemas productivos tropicales.

Rendimiento agrícola

El empleo de Humina generó diferencias altamente significativas en el rendimiento agrícola del cultivar IACuba-41 (Figura 5). El tratamiento con bioproducto alcanzó un rendimiento medio de 3,1 unidades frente a 2,3 unidades del control. Esta diferencia absoluta de 0,8 unidades equivale a un incremento del 34,8 %, magnitud que excede los umbrales de significación práctica establecidos para la adopción de nuevas tecnologías en sistemas productivos de arroz.

El cultivar IACuba-41 es una variedad de arroz de origen cubano con adaptabilidad demostrada a condiciones tropicales y subtropicales. La respuesta positiva al bioproducto Humina evidencia que este genotipo mantiene capacidad de respuesta a mejoras nutricionales y fisiológicas, lo cual indica que su potencial genético permanece subexpresado bajo manejo convencional.

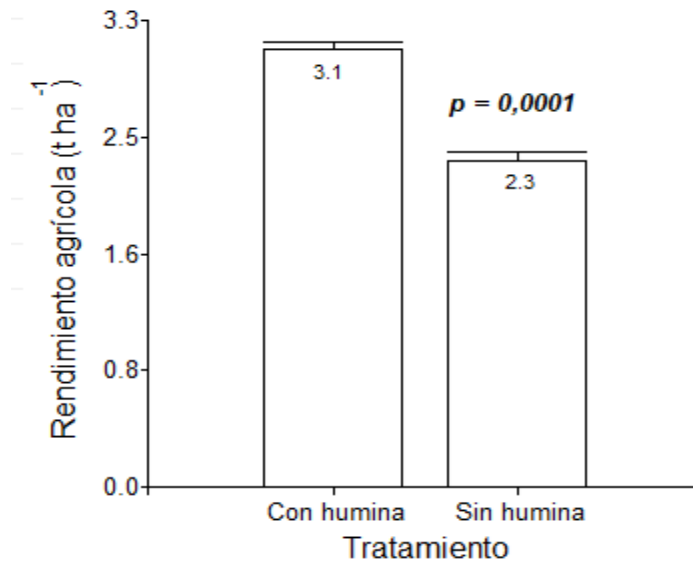


Figura 5. Valores medios y su error estándar del rendimiento agrícola para los tratamientos con Humina y sin Humina en el cultivar IACuba-41. Valores de p menores de 0,05 indican diferencias significativas en la prueba t de *student*.

El incremento observado (34,8 %) supera ampliamente los rangos documentados en meta-análisis recientes (7,4 %-25 %; Chen et al., 2025) y en aplicaciones foliares previas (Izquierdo et al., 2024). Dicha diferencia responde a variaciones en el tipo de bioproducto, condiciones ambientales y características genéticas específicas del cultivar IACuba-41, que presenta mayor sensibilidad a estímulos bioactivos. La magnitud del efecto sugiere que la Humina actúa como bioestimulante y optimizador de la eficiencia en el uso de recursos, no solo como fertilizante. Los mecanismos fisiológicos conservados entre cultivares cubanos incluyen la promoción del crecimiento vegetativo y la mejora en parámetros fotosintéticos como contenido de clorofila y área foliar (Frontela-Zambrana et al., 2025).

La alta significación estadística y la magnitud del efecto indican que los bioproductos húmicos constituyen una tecnología viable para mejorar el rendimiento del cultivar IACuba-41 y potencialmente otros cultivares adaptados a condiciones tropicales. Esta tecnología permite incrementar la productividad sin aumentos proporcionales en insumos externos, lo cual contribuye a la sostenibilidad económica y ambiental del sistema productivo.

Estudios futuros deberán determinar la dosis-respuesta óptima, los momentos de aplicación más efectivos y las combinaciones con otras prácticas de manejo. Asimismo, resulta necesario evaluar efectos sobre la calidad de grano, la resistencia a plagas y enfermedades, y la adaptación al cambio

climático, aspectos cruciales para la adopción comercial de esta tecnología en sistemas productivos de arroz en regiones tropicales.

Análisis de regresión lineal múltiple

El modelo de regresión lineal múltiple no detectó diferencias significativas en ninguno de los tratamientos. Esto indica ausencia de respuesta lineal entre las variables independientes y el rendimiento agrícola (Tabla 1). La mayor precisión del modelo sin Humina sugiere que, en condiciones controladas, los componentes del rendimiento mantienen relaciones más estables y predecibles con el resultado final.

Estadísticos	Con Humina	Sin Humina
R ²	0,9627	0,9988
R ² ajustado	0,8137	0,9938
r	0,902	0,997
RECM	0,0270	0,0051
F-estadístico	6,46	202,77
Valor p	0,286	0,053
Modelo con Humina: Rendimiento = -1,1489 + 0,015717 × Granos llenos – 0,039156 × Granos_vanos + 0,010005 × Paniculas m ² + 0,002458 × Peso 1000 granos		
Modelo sin Humina: Rendimiento = -0,3744 + 0,018353 × Granos_llenos – 0,015189 × Granos vanos + 0,006655 × Paniculas m ² - 0,030170 × Peso 1000 granos		

Tabla 1. Comparación de parámetros de la regresión lineal múltiple en ambos tratamientos.

Los granos llenos por panícula constituyen la variable más influyente en el rendimiento agrícola en ambos tratamientos. Sin embargo, la aplicación de Humina modifica la importancia relativa de los componentes, particularmente la masa de 1000 granos, la cual presenta efectos opuestos entre tratamientos.

El valor elevado de R² (0,9627 con Humina; 0,9988 sin Humina) contrasta con la ausencia de significancia estadística. Esta paradoja se explica por el tamaño muestral reducido (seis observaciones por tratamiento), insuficiente para detectar efectos con cuatro variables predictoras. La marcada diferencia entre R² y R² ajustado en el tratamiento con Humina evidencia sobreajuste, fenómeno donde el modelo captura variación aleatoria en lugar de relaciones poblacionales subyacentes.

La raíz del error cuadrático medio (RECM) evidencia mayor precisión predictiva en el tratamiento control (0,0051) comparado con Humina (0,0270). Esta métrica indica que el modelo sin bioestimulante predice el rendimiento con menor error de estimación. El incremento en el RECM asociado a la Humina refleja una mayor complejidad en las relaciones entre componentes del rendimiento.

Los coeficientes de regresión revelan que los granos llenos por panícula ejercen el efecto más pronunciado ($\beta = 0,0157 \text{ t ha}^{-1}$), seguido por las panículas por metro cuadrado ($\beta = 0,0100 \text{ t ha}^{-1}$). Contrariamente, los granos vanos reducen el rendimiento ($\beta = -0,0392 \text{ t ha}^{-1}$) mediante mecanismos de competencia por fotoasimilados durante el llenado (Kavitha y Janaki, 2018). Estos resultados concuerdan con Izquierdo et al. (2024), quienes identificaron los granos llenos como componente determinante en el rendimiento del arroz.

Las correlaciones parciales difirieron entre tratamientos: con Humina alcanzaron $r = 0,902$, mientras que sin Humina fueron $r = 0,997$ (Austin et al., 2025). Esta disminución en la correlación sugiere que el bioestimulante modifica la estructura de asociaciones entre componentes del rendimiento, lo cual altera la independencia relativa de los predictores. Dicha modificación en las relaciones cuantitativas implica cambios en la asignación de recursos fotosintéticos durante el llenado de grano, posiblemente mediados por mejoras en la eficiencia de uso de nitrógeno (Ma et al., 2024).

Estudios previos reportan hallazgos similares. Caipo et al. (2015) obtuvieron R^2 ajustado de 0,872 ($\approx 0,85$) mediante Diseño de Mezclas, reportando una solución cúbica significativa ($p = 0,0148$) en la evaluación por componentes, aunque sin incluir una prueba F global de ANOVA que integre la significancia omnibus del modelo completo. Mientras tanto, Izquierdo et al. (2024) documentaron $R^2 > 0,90$ con problemas de significancia atribuibles a tamaños muestrales reducidos. Sima et al. (2018) confirmaron que investigaciones agrícolas con menos de 20 observaciones presentan limitaciones estadísticas sistemáticas. Por tanto, la interpretación de los coeficientes diferenciales entre tratamientos debe considerarse preliminar, dado el limitado poder estadístico del análisis actual.

Aunque el humus líquido de lombriz constituye la base de Humina, los resultados obtenidos también se atribuyen a otros componentes. Destaca la presencia de *Azotobacter chroococcum*, bacteria que fija nitrógeno biológicamente. Estudios demuestran que dicha inoculación incrementa

el nitrógeno en tejidos vegetales y sintetiza fitohormonas como el ácido indol-3-acético (AIA), compuesto que estimula la elongación radicular y la división celular (Revillas *et al.*, 2000). En cultivos de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y maíz (*Zea mays* L.), esta bacteria aumenta la biomasa seca y el rendimiento mediante interacciones radiculares que potencian la absorción de agua y nutrientes (Gopalakrishnan *et al.*, 2015).

Pseudomonas fluorescens es una bacteria rizosférica que solubiliza fosfatos insolubles y produce sideróforos de alta afinidad. Esto mejora la nutrición fosforada de las plantas y reduce la disponibilidad de hierro para patógenos edáficos (Richardson *et al.*, 2009). En arroz, la inoculación con esta especie controla enfermedades foliares y radiculares, incluida la pudrición del tallo por *Sclerotium oryzae*, mediante la síntesis de antibióticos y la inducción de resistencia sistémica (Ahmad *et al.*, 2008). Cepas de esta bacteria actúan como biofertilizantes mediante la liberación de ácidos orgánicos que disuelven minerales fosfáticos. Esto facilita su asimilación en etapas críticas (Gopalakrishnan *et al.*, 2015).

El género *Trichoderma*, particularmente *T. harzianum*, *T. viride*, *T. reesei* y *T. asperellum*, funciona como agente de control biológico contra fitopatógenos. Según Harman *et al.* (2004), este hongo ejerce control mediante competencia por espacio y nutrientes, antibiosis por metabolitos secundarios antifúngicos, micoparasitismo directo e inducción de resistencia sistémica en plantas hospedadoras.

Benítez *et al.* (2004) demostraron que cepas de *Trichoderma* producen antibióticos como trichodermanos, harzianólidos y viridinas. Estos compuestos inhiben hongos patógenos como *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Pythium* y *Botrytis*. La capacidad de este género para establecer relaciones simbióticas con raíces vegetales permite una colonización efectiva de la rizosfera. Esta interacción genera una barrera biológica que protege las plantas contra invasiones patogénicas (Howell, 2003).

Además de sus propiedades de biocontrol, *Trichoderma* actúa como bioestimulante vegetal. Stewart y Hill (2014) confirmaron que la inoculación con este hongo mejora la germinación de semillas, el desarrollo radicular, la absorción de nutrientes y la biomasa. Los mecanismos incluyen la síntesis de fitohormonas como auxinas, giberelinas y citoquininas, las cuales estimulan el crecimiento radicular (Contreras-Cornejo *et al.*, 2009).

Trichoderma solubiliza fosfatos y minerales, lo cual incrementa su disponibilidad para la absorción vegetal (Altomare et al., 1999). Asimismo, este género mejora la tolerancia de las plantas a estrés biótico y abiótico, tales como sequías, sales y metales pesados (Mastouri et al., 2010).

Conclusiones

La aplicación del biofertilizante Humina (4 L ha⁻¹) en el cultivar de arroz IACuba-41 demostró un efecto positivo significativo sobre los componentes del rendimiento, estimulando el número de granos llenos por panícula, la cantidad de panículas por metro cuadrado y la masa de 1000 granos. Este conjunto de respuestas fisiológicas-morfológicas se tradujo en un incremento del rendimiento agrícola del 34,8 % en comparación con el tratamiento control. No obstante, a pesar de esta mejora integral, el análisis estadístico reveló que los componentes del rendimiento evaluados no mostraron una influencia lineal significativa entre los tratamientos con y sin Humina, lo que sugiere que su efecto promotor podría estar modulado por interacciones complejas y no meramente aditivas, posiblemente vinculadas a mecanismos de bioestimulación integral en la planta y la rizosfera por efecto de la actividad microbiana benéfica de la Humina y su aporte en la nutrición y salud del cultivo. Lo cual demuestra las potencialidades del uso de la Humina para el aumento del rendimiento del arroz producido con bajos insumos de producción en el oriente de Cuba.

Bibliografía

- Ahmad, F., Ahmad, I., & Khan, M. S. (2008). Screening of free-living rhizospheric bacteria for their multiple plant growth promoting activities. *Microbiological Research*, 163(2), 173–181. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2006.04.001>
- Altomare, C., Norvell, W. A., Björkman, T., & Harman, G. E. (1999). Solubilization of phosphates and micronutrients by the plant-growth-promoting and biocontrol fungus *Trichoderma harzianum* Rifai 1295-22. *Applied and Environmental Microbiology*, 65(7), 2926–2933. <https://doi.org/10.1128/AEM.65.7.2926-2933.1999>
- Austin, P. C., Eekhout, I., & van Buuren, S. (2025). Evaluating the median p-value method for assessing statistical significance in randomized controlled trials. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 95(3), 523–541. <https://doi.org/10.1080/02664763.2024.2418473>

- Beneduzi, A., Ambrosini, A., & Passaglia, L. M. P. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Their potential as antagonists and biocontrol agents. *Genetics and Molecular Biology*, 35(4 Suppl), 1044–1051. <https://doi.org/10.1590/S1415-47572012000600020>
- Benítez, T., Rincón, A. M., Limón, M. C., & Codón, A. C. (2004). Biocontrol mechanisms of *Trichoderma* strains. *International Microbiology*, 7(4), 249–260. PMID: 15666245. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15666245/>
- Bera, B., Bokado, K., Barkha, Bag, A. G., & Naga, T. T. R. (2024). Effect of farmyard manure and humic acid on growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Science Today*, 11(4), 1596–1604. <https://doi.org/10.14719/pst.3755>
- Caipo, Y., Gutiérrez, A., & Julca, A. (2015). Optimización por diseño de mezclas de la aceptabilidad de una barra energética a base de quinua (*Chenopodium quinoa*), kiwicha (*Amaranthus caudatus*) y cañihua (*Chenopodium pallidicaule*) evaluada en niños. *Agroindustrial Science*, 5(1), 61–67. <https://doi.org/10.17268/agroind.science.2015.01.06>
- Chen, H., Ruan, Y., & Jia, Z. (2025). A Meta-Analysis of 30 Years in China and Micro-District Experiments Shows Organic Fertilizer Quantification Combined with Chemical Fertilizer Reduction Enhances Rice Yield on Saline-Alkali Land. *Rice Science*, 32(2), 259–272. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2025.01.004>
- Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L., Cortés-Penagos, C., & López-Bucio, J. (2009). *Trichoderma virens*, a plant beneficial fungus, enhances biomass production and promotes lateral root growth through an auxin-dependent mechanism in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 149(3), 1579–1592. <https://doi.org/10.1104/pp.108.130369>
- De Moura, O. V. T., Berbara, R. L. L., De Oliveira Torchia, D. F., Da Silva, H. F. O., Van Tol De Castro, T. A., Tavares, O. C. H., Rodrigues, N. F., Zonta, E., Santos, L. A., & García, A. C. (2023). Humic foliar application as sustainable technology for improving the growth, yield, and abiotic stress protection of agricultural crops: A review. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 22(8), 493–513. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2023.05.001>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2020). InfoStat (Versión 2020) [Software]. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. <http://www.infostat.com.ar>

- Efthimiadou, A., Katsenios, N., Chanioti, S., Karatassiou, M., Kougias, T. G., Bartzialis, C., Tsivelika, N., Tzerakis, C., Xatzitheodorou, A., Tsakalidou, E., Ntatsi, G., & Savvas, D. (2020). Effect of foliar and soil application of plant growth promoting bacteria (*Azotobacter chroococcum*, *Bacillus subtilis* and *Bacillus megatherium*) on growth, physiology, yield and seed quality of maize under Mediterranean conditions. *Scientific Reports*, *10*, 21060. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78034-6>
- El-Aty, M. S. A., Abo-Youssef, M. I., Sorour, F. A., Salem, M., Gomma, M. A., Ibrahim, O. M., Yaghoubi Khanghahi, M., Al-Qahtani, W. H., Abdel-Maksoud, M. A., & El-Tahan, A. M. (2024). Performance and stability for grain yield and its components of some rice cultivars under various environments. *Agronomy*, *14*(9), 2137. <https://doi.org/10.3390/agronomy14092137>
- Frontela-Zambrana, J. M., Maqueira López, L., Pérez León, N. de J., & Páez López, A. (2025). Productive Rice cultivar IACuba 41, in state seed production area in Los Palacios. *Avances*, *27*(2), 166-178. <https://avances.pinar.cu/index.php/publicaciones/article/view/911/2197>
- Fukagawa, N. K., & Ziska, L. H. (2019). Rice: Importance for Global Nutrition. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*, *65*(Supplement), S2–S3. <https://doi.org/10.3177/jnsv.65.S2>
- Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications. *Scientifica*, *2012*, 963401. <https://doi.org/10.6064/2012/963401>
- Gopalakrishnan, S., Srinivas, V., Alekhya, G., & Prakash, B. (2015). Effect of plant growth-promoting *Streptomyces* sp. on growth promotion and grain yield in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *3 Biotech*, *5*(6), 799–806. <https://doi.org/10.1007/s13205-015-0283-8>
- Harman, G. E., Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I., & Lorito, M. (2004). *Trichoderma* species — opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nature Reviews Microbiology*, *2*(1), 43–56. <https://doi.org/10.1038/nrmicro797>
- Hashim, N., Mohd Ali, M., Mahadi, M. R., Abdullah, A. F., Wayayok, A., Mohd Kassim, M. S., & Jamaluddin, A. (2024). Smart farming for sustainable rice production: An insight into application, challenge, and future prospect. *Rice Science*, *31*(1), 47–61. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2023.08.004>

- Hernández, R., Robles, C., Calderín, A., Guridi, F., Reynaldo, I. M., & González, D. (2018). Efectos antiestrés de ácidos húmicos de vermicompost en dos cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.). *Cultivos Tropicales*, 39(2), 65–74. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362018000200009
- Hernández-Jiménez, A., Pérez-Jiménez, J. M., Bosch-Infante, D., & Castro Speck, N. (2019). La clasificación de suelos de Cuba: énfasis en la versión de 2015. *Cultivos Tropicales*, 40(1), a15-e15. Recuperado a partir de <https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/view/1504>
- Howell, C. R. (2003). Mechanisms employed by *Trichoderma* species in the biological control of plant diseases: The history and evolution of current concepts. *Plant Disease*, 87(1), 4–10. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2003.87.1.4>
- IIG-CUBA: Instructivo Técnico del Cultivo del Arroz (2020). Instituto de Investigaciones de Granos (IIG), Imprenta EAS-MINAG, La Habana, Cuba, 142 p.
- Izquierdo, J., Arriagada, O., Garcia-Pintos, G., Ortiz, R., Garcia-Pintos, M., Buschiazzi, D., Mendez-Gonzalez, L., Rizzo, J., Pancotto, V., Bouza, C., Godoy, T., Celaya, P., Jaurena, G., & Garcia-Mina, J.-M. (2024). On-farm foliar application of a humic biostimulant increases the yield of rice. *Agronomy Journal*, 116(5), 2551–2563. <https://doi.org/10.1002/agj2.21641>
- Joneer, A., & Sam, L. M. (2022). Effect of humic acid on growth and yield of Tadong upland rice. *Science, Engineering and Health Studies*, 16, 22030011. <https://doi.org/10.14456/sehs.2022.50>
- Kavitha, M. P., & Janaki, D. (2018). Crop – weed modeling and fitting multiple regression equation in system of rice intensification. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(9), 3005–3013. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.709.374>
- Lakra, N. U., Samadhiya, V. K., Parghanha, S., & Soni, P. (2025). Influence of foliar-applied liquified humic acid on growth, yield, and yield components of rice in Vertisol conditions of Chhattisgarh. *International Journal of Research in Agronomy*, 8(11), 791–796. <https://doi.org/10.33545/2618060X.2025.v8.i11k.4279>

- Ma, Y., Cheng, X., & Zhang, Y. (2024). The impact of humic acid fertilizers on crop yield and nitrogen use efficiency: A meta-analysis. *Agronomy*, 14(12), 2763. <https://doi.org/10.3390/agronomy14122763>
- Mastouri, F., Björkman, T., & Harman, G. E. (2010). Seed treatment with *Trichoderma harzianum* alleviates biotic, abiotic, and physiological stresses in germinating seeds and seedlings. *Phytopathology*, 100(11), 1213–1221. <https://doi.org/10.1094/PHTO-03-10-0091>
- Muthayya, S., Sugimoto, J. D., Montgomery, S., & Maberly, G. F. (2014). An overview of global rice production, supply, trade, and consumption. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1324(1), 7–14. <https://doi.org/10.1111/nyas.12540>
- Oh, S., & Cho, Y.-S. (2025). Effects of water management practices on rice grain quality and pest-disease incidence in environmentally friendly cultivation systems. *Agriculture*, 15(21), 2244. <https://doi.org/10.3390/agriculture15212244>
- Puteh, A. B., Mondal, M. M. A., Ismail, M. R., & Latif, M. A. (2014). Grain sterility in relation to dry mass production and distribution in rice (*Oryza sativa* L.). *BioMed Research International*, 2014, Article 302179. <https://doi.org/10.1155/2014/302179>
- Revillas, J. J., Rodelas, B., Pozo, C., Martínez-Toledo, M. V., & González-López, J. (2000). Production of B-group vitamins by two *Azotobacter* strains with phenolic compounds as sole carbon source under diazotrophic and nondiazotrophic conditions. *Journal of Applied Microbiology*, 89(3), 486–493. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2000.01139.x>
- Richardson, A. E., Barea, J. M., McNeill, A. M., & Prigent-Combaret, C. (2009). Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant and Soil*, 321(1-4), 305–339. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9895-2>
- Sima, N. Q., Harmel, R. D., Fang, Q. X., Ma, L., & Andales, A. A. (2018). A modified F-test for evaluating model performance by including both experimental and simulation uncertainties. *Environmental Modelling & Software*, 104, 236–248. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.03.011>
- Saha, B. K., Islam, Z., & Basak, R. K. (2013). Growth and yield of rice (*Oryza sativa*) as influenced by humic acid and poultry manure. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2(12), 241–248. <https://doi.org/10.13189/ujps.2013.010304>

- Singh, D., Suhag, M., & Dhaka, A. K. (2025). Insights of agricultural sustainability by the use of earthworms. *Discover Applied Sciences*, 7(1), 322. <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00322-4>
- Stewart, A., & Hill, R. (2014). Applications of *Trichoderma* in plant growth promotion. En V. K. Gupta, M. Schmoll, A. Herrera-Estrella, R. S. Upadhyay, I. Druzhinina, & M. G. Tuohy (Eds.), *Biotechnology and Biology of Trichoderma* (pp. 415–428). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59576-8.00031-X>
- Vejan, P., Abdullah, R., Khadiran, T., Ismail, S., & Nasrulhaq Boyce, A. (2016). Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability—A review. *Molecules*, 21(5), 573. <https://doi.org/10.3390/molecules21050573>
- Zheng, E., Qin, M., Zhang, Z., & Xu, T. (2022). Humic Acid Fertilizer Incorporation Increases Rice Radiation Use, Growth, and Yield: A Case Study on the Songnen Plain, China. *Agriculture*, 12(5), 653. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050653>