


Research Article


Effect of *Aloe vera* gel seed treatment on the physiological quality of *Zea mays* L. seedlings

Efecto del tratamiento de semillas con gel de *Aloe vera* sobre la calidad fisiológica de plántulas de *Zea mays* L.

Alice Beatriz Peña Medina^{1*} Jorge Ramon Cantero Piñanez^{2,3}

¹ Dirección de Investigación, Facultad de Ingeniería Agronómica, Universidad Nacional del Este, Minga Guazú, Paraguay.

² Centro de Bioinformática, Facultad de Química, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

³ Centro de Investigaciones Médicas, Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Nacional del Este, Ciudad del Este, Paraguay

*Autor de correspondencia: ecilabeatriz@gmail.com

Received: 30 April 2026. Accepted: 10 June 2026. Published: 30 June 2026.

Abstract

The use of bioinputs in combination with plant biostimulants is a sustainable strategy for improving early seedling growth in agricultural systems. In this study, *Aloe vera* gel was evaluated as a natural seed-treatment matrix and plant biostimulant, applied either alone or in combination with *T. harzianum* and *Bacillus* spp. The aim was to assess its effect on the early growth of maize seedlings under controlled laboratory conditions. The experiment was conducted using a completely randomized 2×2×2 factorial design with eight treatments and four replications, including the treatment without *Aloe vera*, without *T. harzianum* and without *Bacillus* spp. as the factorial reference cell. Evaluations included vigor, germination, seedling growth and biomass. The overall treatment comparison showed significant differences in vigor ($p = 0.0498$), seedling height ($p = 0.0018$), root length ($p < 0.001$) and shoot height ($p = 0.0078$), whereas final germination, dry weight and fresh weight did not differ significantly among treatments. Because vigor and germination are count responses, both variables were reanalyzed using binomial and quasibinomial generalized linear models. The quasibinomial model confirmed a positive effect of *Aloe vera* on vigor ($p = 0.0118$), whereas interactions with microbial inputs were interpreted as trends of response modulation rather than conclusive antagonistic effects. In conclusion, sabila gel showed a favorable effect mainly on vigor and early seedling growth in maize; however, its role as an adhesive agent should be considered potential, since coating adhesion and microbial recovery after drying were not directly measured.

Keywords: plant biostimulants; *T. harzianum*; *Bacillus* spp.; microorganisms.

Resumen

El uso de bioinsumos en combinación con bioestimulantes vegetales constituye una estrategia sostenible para mejorar el crecimiento inicial de plántulas en sistemas agrícolas. En este contexto, el gel de *Aloe vera* fue evaluado como matriz natural de tratamiento de semillas y como bioestimulante vegetal, aplicado solo o en combinación con *T. harzianum* y *Bacillus* spp. El objetivo del estudio, fue evaluar su efecto sobre el crecimiento inicial de plántulas de maíz bajo condiciones controladas de laboratorio. El experimento, se realizó mediante un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2×2×2, con ocho tratamientos y cuatro repeticiones, incluyendo el tratamiento sin *Aloe vera*, sin *T. harzianum* y sin *Bacillus* spp. como celda factorial de referencia. Las evaluaciones incluyeron vigor, germinación, crecimiento de plántula y biomasa. La comparación global entre tratamientos mostró diferencias significativas en vigor ($p = 0,0498$), altura de plántula ($p = 0,0018$), longitud de raíz ($p < 0,001$) y altura aérea ($p = 0,0078$), mientras que la germinación, el peso seco y el peso fresco no presentaron diferencias significativas entre tratamientos. Debido a la naturaleza de conteo de vigor y germinación, ambas variables fueron reanalizadas mediante modelos lineales generalizados binomiales y quasibinomiales. El modelo quasibinomial confirmó un efecto positivo de *Aloe vera* sobre el vigor ($p = 0,0118$), mientras que las interacciones con los microorganismos se interpretaron como tendencias de modulación y no como antagonismos concluyentes. El gel de *Aloe vera*, mostró un efecto favorable principalmente sobre el vigor y el crecimiento inicial de plántulas de maíz; sin embargo, su papel como agente adherente debe considerarse potencial, ya que no se midieron directamente la adhesividad del recubrimiento ni la recuperación microbiana posterior al secado.

Palabras clave: bioestimulantes vegetales; *T. harzianum*; *Bacillus* spp., microorganismos.

Introducción

En la agricultura moderna, los bioestimulantes representan herramientas biotecnológicas ampliamente utilizadas para mejorar la productividad agrícola, incrementar la eficiencia en el uso de nutrientes y reducir la dependencia de fertilizantes químicos sintéticos (du Jardin, 2015; Vessey, 2003; Backer et al., 2018; Rouphael & Colla, 2020). Estos se definen como sustancias o microorganismos que, independientemente de su contenido nutricional, mejoran la eficiencia de la nutrición vegetal, la tolerancia al estrés y la calidad del cultivo, mediante la estimulación de procesos fisiológicos asociados al crecimiento y desarrollo vegetal (Bulgari et al., 2019; Calvo & Kloepper, 2014; du Jardin, 2015; Yakhin et al., 2017; Sible et al., 2021).

Dentro de los bioestimulantes de origen vegetal, el *Aloe vera* L. (sábila o aloe) ha generado interés debido a sus propiedades bioactivas, incluyendo actividad antioxidante, antimicrobiana y reguladora del crecimiento vegetal (Eshun & He, 2004; Surjushe et al., 2008; Sánchez et al., 2020). Su gel mucilaginoso contiene polisacáridos, aminoácidos, vitaminas y compuestos fenólicos que pueden influir en procesos fisiológicos asociados a la germinación y el desarrollo inicial de las plantas (Catalano et al., 2024; Ushasree et al., 2024). Asimismo, estudios han reportado efectos positivos de extractos de aloe sobre el crecimiento vegetal, favoreciendo el desarrollo radicular, la acumulación de biomasa y el vigor de plántulas mediante la acción de compuestos bioactivos y fitohormonas presentes en el gel (Araque-Pérez, 2025; Tucuch-Haas et al., 2022).

Por otro lado, microorganismos como *Bacillus* spp. y *Trichoderma harzianum* son ampliamente utilizados como bioinsumos debido a su capacidad para promover el crecimiento vegetal mediante la producción de fitohormonas, la solubilización de nutrientes y el biocontrol de patógenos del suelo (Harman et al., 2004; Radhakrishnan & Lee, 2016; Tsoetsi et al., 2022). En particular, *Bacillus* spp. se caracteriza por su capacidad de mejorar la disponibilidad de nutrientes y estimular el crecimiento inicial de las plantas, mientras que *T. harzianum* actúa como agente de biocontrol y promotor del crecimiento mediante la inducción de resistencia y la mejora del desarrollo radicular (Harman et al., 2004; Woo et al., 2023).

El establecimiento temprano de las plántulas depende del vigor de las semillas y los tratamientos aplicados, los cuales pueden influir en la emergencia, la uniformidad y el desempeño inicial del cultivo, afectando la eficiencia del tratamiento de semillas en condiciones variables (França-Neto et al., 2016). En este contexto, la combinación de bioestimulantes vegetales con microorganismos promotores del crecimiento puede generar respuestas variables en las plantas, debido a posibles interacciones que pueden modificar la eficacia de sus mecanismos de acción y, en consecuencia, la respuesta fisiológica durante las etapas iniciales del desarrollo vegetal (Bashan et al., 2014; Sible et al., 2021; Santoyo et al., 2024).

Si bien existen antecedentes que demuestran efectos positivos del gel de aloe, así como de *T. harzianum* y *Bacillus* spp. sobre el crecimiento vegetal, la mayor parte de la evidencia disponible corresponde a evaluaciones realizadas de forma independiente para cada agente biológico (Harman et al., 2004; Radhakrishnan & Lee, 2016; Sánchez et al., 2020; Tucuch-Haas et al., 2022; Woo et al., 2023; Araque-Pérez, 2025). Desde el punto de vista tecnológico, el tratamiento o recubrimiento de semillas puede cumplir funciones diferentes: actuar como vehículo de distribución, favorecer la permanencia física de los insumos sobre la semilla y aportar compuestos bioactivos capaces de modificar la respuesta fisiológica. Por ello, el uso del gel de sábila como matriz natural debe diferenciarse de la demostración experimental de una función adhesiva, la cual requiere mediciones específicas de retención, desprendimiento, ganancia de masa o recuperación microbiana luego del secado.

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto del gel de aloe al 5 % como matriz natural de tratamiento de semillas de maíz, aplicado de forma individual o en combinación con *T. harzianum* y *Bacillus* spp., sobre la calidad fisiológica de plántulas bajo condiciones controladas de laboratorio. De manera complementaria, el análisis buscó identificar posibles patrones de modulación de la respuesta fisiológica cuando el aloe se combinó con los bioinsumos microbianos.

Materiales y métodos

Ubicación del estudio

El experimento se realizó en el Laboratorio de Semillas de la Dirección de Investigación de la Facultad de Ingeniería Agronómica de la Universidad Nacional del Este (FIA-UNE), Minga Guazú, Paraguay, bajo condiciones controladas de laboratorio destinadas a ensayos de calidad fisiológica de semillas.

Muestra de semillas

Se utilizaron semillas de maíz, híbrido NS 5933 IPRO, campaña agrícola 2024/2025, provenientes de un lote comercial sin tratamiento químico previo. Antes de la aplicación de los tratamientos, las semillas fueron desinfectadas superficialmente con hipoclorito de sodio (NaClO) al 2 % durante 1 min y posteriormente secadas a temperatura ambiente. No se contó con determinaciones independientes de germinación inicial, vigor inicial ni humedad del lote previas al ensayo; por ello, estos aspectos se reconocen como limitaciones del reporte experimental.

Preparación del gel de aloe

La sábila se obtuvo a partir de hojas maduras previamente seleccionadas, lavadas y desinfectadas. El mucílago interno fue extraído de forma aséptica mediante fileteado, con separación manual del parénquima gelatinoso. El material fresco se incorporó en agua destilada (100 g en 100 mL) y se procesó en licuadora hasta obtener una mezcla homogénea. Posteriormente, la suspensión fue filtrada utilizando embudo con algodón y papel filtro para la remoción de impurezas. A partir del extracto obtenido se preparó una solución al 5 % (p/v), en concordancia con estudios previos donde aloe ha sido evaluada como regulador de crecimiento en el cultivo de chile (*Capsicum chinense*), destacándose dicha concentración por sus efectos positivos sobre el establecimiento de plántulas (Tucuch-Haas et al., 2022).

Bioinsumos

Se utilizaron bioinsumos comerciales a base de *Trichoderma harzianum* y *Bacillus* spp., aplicados según las recomendaciones del fabricante. Las dosis de referencia fueron: *T. harzianum*, 100 mL por 100 kg de semillas (1×10^9 UFC mL⁻¹); *Bacillus* spp., 100 mL por 60.000 semillas (4×10^9 UFC mL⁻¹); y gel de sábila al 5 % (p/v) como tratamiento de semillas. No se realizó identificación molecular, ni depósito de cepas, tampoco recuentos independientes de viabilidad microbiana antes y después del recubrimiento y secado. Por ello, los resultados deben interpretarse en función de los productos comerciales evaluados y no como una comparación entre cepas microbiológicas caracterizadas.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño completamente al azar (DCA) con arreglo factorial 2×2×2, considerando como factores la presencia o ausencia de gel de sábila, *T. harzianum* y *Bacillus* spp. Se establecieron ocho tratamientos con cuatro repeticiones, totalizando 32 unidades experimentales (UE). El tratamiento T1 correspondió a la combinación factorial sin *Aloe vera*, sin *T. harzianum* y sin *Bacillus* spp.; por lo tanto, fue incluido en todos los análisis factoriales como celda de referencia del diseño. Cada UE estuvo constituida por dos submuestras de 20 semillas, y los valores de conteo y crecimiento fueron resumidos a nivel de UE antes del análisis estadístico, evitando tratar submuestras o plántulas individuales como réplicas independientes.

Aplicación de tratamientos

Las semillas fueron colocadas en bolsas plásticas estériles y recubiertas con las suspensiones correspondientes según tratamiento. Las diluciones se realizaron con ayuda de micropipetas y los insumos fueron ajustados proporcionalmente dentro de un volumen total estandarizado de 5 mL por 100 g de semillas (**Tabla 1**). La aplicación se realizó mediante agitación manual estandarizada para favorecer una distribución uniforme del material sobre la superficie de las semillas.

Posteriormente, las semillas fueron secadas a temperatura ambiente durante 24 h para la estabilización del tratamiento antes de las evaluaciones. En este ensayo no se cuantificaron métricas físicas del recubrimiento, tales como fuerza de adhesión, desprendimiento de polvo, ganancia de masa o tiempo de secado, ni se evaluó la recuperación microbiana después del secado; estos aspectos se consideran limitaciones metodológicas y objetivos para estudios posteriores.

Evaluación de variables

Las semillas fueron sembradas en rollos de papel germitest humedecidos con agua destilada en proporción de 2,5 veces el peso del papel seco, colocados en posición vertical y mantenidos en cámara BOD (Demanda Bioquímica de Oxígeno) bajo fotoperiodo de 12 horas (**ISTA, 2026; Brasil, 2009**). En este procedimiento se utilizaron 20 semillas por submuestra, con dos submuestras por unidad experimental (n = 40). La temperatura exacta de incubación y la humedad relativa de la cámara BOD no fueron registradas como covariables instrumentales independientes, por lo que no se incorporaron al análisis estadístico.

Tabla 1. Descripción de los tratamientos con bioinsumos y gel de *A. vera* como matriz natural de tratamiento de semillas de maíz (FIA-UNE, 2026).

Descripción del Tratamiento	AV* (μL)	Th* (μL)	Bs (μL)*	AE (μL)*	VT (μL)*
T1=Agua destilada estéril (control factorial 0/0/0)	0	0	0	5000	5000
T2=Gel de <i>Aloe vera</i>	250	0	0	4750	5000
T3= <i>T. harzianum</i>	0	100	0	4900	5000
T4 = <i>Bacillus</i> spp.	0	0	840	4160	5000
T5= <i>T. harzianum</i> + <i>Bacillus</i> spp.	0	100	840	4060	5000
T6= Gel de <i>Aloe vera</i> + <i>T. harzianum</i>	250	100	0	4650	5000
T7=Gel de <i>Aloe vera</i> + <i>Bacillus</i> spp.	250	0	840	3910	5000
T8=Gel de <i>Aloe vera</i> + <i>T. harzianum</i> + <i>Bacillus</i> spp.	250	100	840	3810	5000

*Nota. AV = gel de *Aloe vera*; Th = *Trichoderma harzianum*; Bs = *Bacillus* spp.; AE = agua estéril; VT = volumen total. Todos los volúmenes se expresan en μL.

Vigor y germinación: El vigor se determinó mediante el primer conteo de plántulas normales a los 4 días después de la siembra (dds), mientras que la germinación final se evaluó a los 7 dds mediante el último conteo de plántulas normales. Ambas variables fueron registradas como conteos de plántulas normales sobre 40 semillas por UE, considerando la suma de las dos submuestras de 20 semillas.

Crecimiento de plántula: A los 7 dds, se evaluó el crecimiento de las plántulas normales obtenidas en el conteo final, mediante la medición de la longitud total de la plántula, así como de la parte aérea (PA) y la parte radicular (PR), expresadas en centímetros.

Biomasa: A partir de la evaluación de crecimiento de plántulas, se registró el peso fresco total por UE y, posteriormente, el material vegetal fue secado en estufa hasta peso constante para la determinación del peso seco. Los valores de biomasa se expresaron en gramos (g) con tres decimales por unidad experimental.

Análisis estadístico

Los datos fueron sometidos a verificación de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk y de homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. Para la comparación global entre los ocho tratamientos se aplicó ANOVA de una vía cuando se cumplieron los supuestos; en caso contrario, se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis. Cuando correspondió, las comparaciones múltiples se realizaron mediante Duncan para variables paramétricas y Dunn con ajuste de Bonferroni para variables no paramétricas. Dado que vigor y germinación corresponden a respuestas de conteo sobre 40 semillas por UE, ambas variables fueron reanalizadas mediante modelos lineales generalizados binomiales y quasibinomiales, especificando la respuesta como éxitos y fracasos: c_{bind} (plántulas normales, semillas no normales) ~ *Aloe vera* × *T. harzianum* × *Bacillus* spp. Para las variables continuas de crecimiento y biomasa se ajustaron modelos factoriales lineales completos, incluyendo las interacciones de segundo y tercer orden, y se reportaron pruebas robustas HC3 como análisis de sensibilidad frente al tamaño muestral reducido y posibles desviaciones de homocedasticidad. En todos los modelos factoriales se mantuvo T1 como celda sin *Aloe vera*, sin *T. harzianum* y sin *Bacillus* spp.

Resultados

Las respuestas asociadas a la calidad fisiológica de las semillas de maíz tratadas con diferentes combinaciones de gel de *Aloe vera*, *T. harzianum* y *Bacillus* spp. fueron analizadas considerando la unidad experimental como nivel de inferencia. La comparación global entre los ocho tratamientos mostró diferencias significativas en vigor ($p = 0,0498$), altura de plántula ($p = 0,0018$), longitud de raíz ($p < 0,001$) y altura aérea ($p = 0,0078$). En cambio, la germinación final ($p = 0,1703$), el peso seco ($p = 0,2430$) y el peso fresco ($p = 0,2358$) no presentaron diferencias significativas entre tratamientos (**Tabla S1; Tabla 2; Figura 1**).

El reanálisis factorial manteniendo la estructura completa $2 \times 2 \times 2$ e incluyendo T1 como celda de referencia mostró que *Aloe vera* fue el factor con respuesta más consistente. En el modelo quasibinomial para vigor, *Aloe vera* presentó un efecto positivo significativo ($p = 0,0118$), mientras que *T. harzianum* ($p = 0,5409$) y *Bacillus* spp. ($p = 0,8891$) no mostraron efectos principales significativos. Las interacciones *Aloe vera* × *T. harzianum* ($p = 0,0800$), *Aloe vera* × *Bacillus* spp. ($p = 0,0665$) y *T. harzianum* × *Bacillus* spp. ($p = 0,0585$) se interpretaron como tendencias de modulación de la respuesta, no como interacciones concluyentes al ajustar por sobredispersión (**Tabla S2; Figura 1**).

Tabla 2. Efecto de las combinaciones de *Aloe vera*, *T. harzianum* y *Bacillus* spp. sobre variables fisiológicas de *Z. mays* (media ± DE; letras distintas indican diferencias significativas cuando correspondió).

Trat.*	Vigor	Germinación	Altura plántula (cm)	Longitud raíz (cm)	Altura aérea (cm)	Peso seco (g)	Peso fresco (g)
T1	12.50 ± 1.47 b	16.50 ± 1.47	7.96 ± 1.31 b	3.91 ± 1.69 c	4.12 ± 0.63 b	0.68 ± 0.27	3.94 ± 0.87
T2	13.25 ± 2.40 b	15.88 ± 1.38	20.14 ± 7.33 a	10.20 ± 3.59 a	9.83 ± 5.42 a	0.76 ± 0.08	4.01 ± 1.12
T3	12.00 ± 1.35 b	15.12 ± 1.93	12.16 ± 0.48 a	7.58 ± 0.84 ab	4.44 ± 0.48 a	0.58 ± 0.07	2.91 ± 0.73
T4	13.88 ± 0.63 ab	15.25 ± 0.29	14.52 ± 1.63 a	8.22 ± 1.40 a	6.29 ± 3.02 a	0.70 ± 0.11	3.26 ± 0.39
T5	12.88 ± 1.38 b	16.88 ± 1.70	9.36 ± 3.16 b	4.96 ± 1.95 bc	4.40 ± 1.36 a	0.66 ± 0.34	3.89 ± 2.34
T6	16.38 ± 1.89 a	17.38 ± 1.65	18.39 ± 2.68 a	10.69 ± 0.92 a	7.41 ± 1.42 a	0.92 ± 0.28	6.03 ± 2.92
T7	14.12 ± 1.93 ab	17.50 ± 0.91	16.55 ± 2.58 a	10.22 ± 2.11 a	6.33 ± 0.80 a	0.93 ± 0.26	3.17 ± 1.69
T8	13.50 ± 2.04 b	16.38 ± 1.11	16.73 ± 1.93 a	9.90 ± 1.29 a	5.70 ± 0.60 a	0.69 ± 0.15	2.91 ± 1.89
p global	0,0498	0,1703	0,0018	<0,001	0,0078	0,2430	0,2358

*Nota. Trat= Tratamiento; T1 = control; T2 = Aloe; T3 = Trichoderma; T4 = Bacillus; T5 = Trichoderma + Bacillus; T6 = Aloe + Trichoderma; T7 = Aloe + Bacillus; T8 = Aloe + Trichoderma + Bacillus.

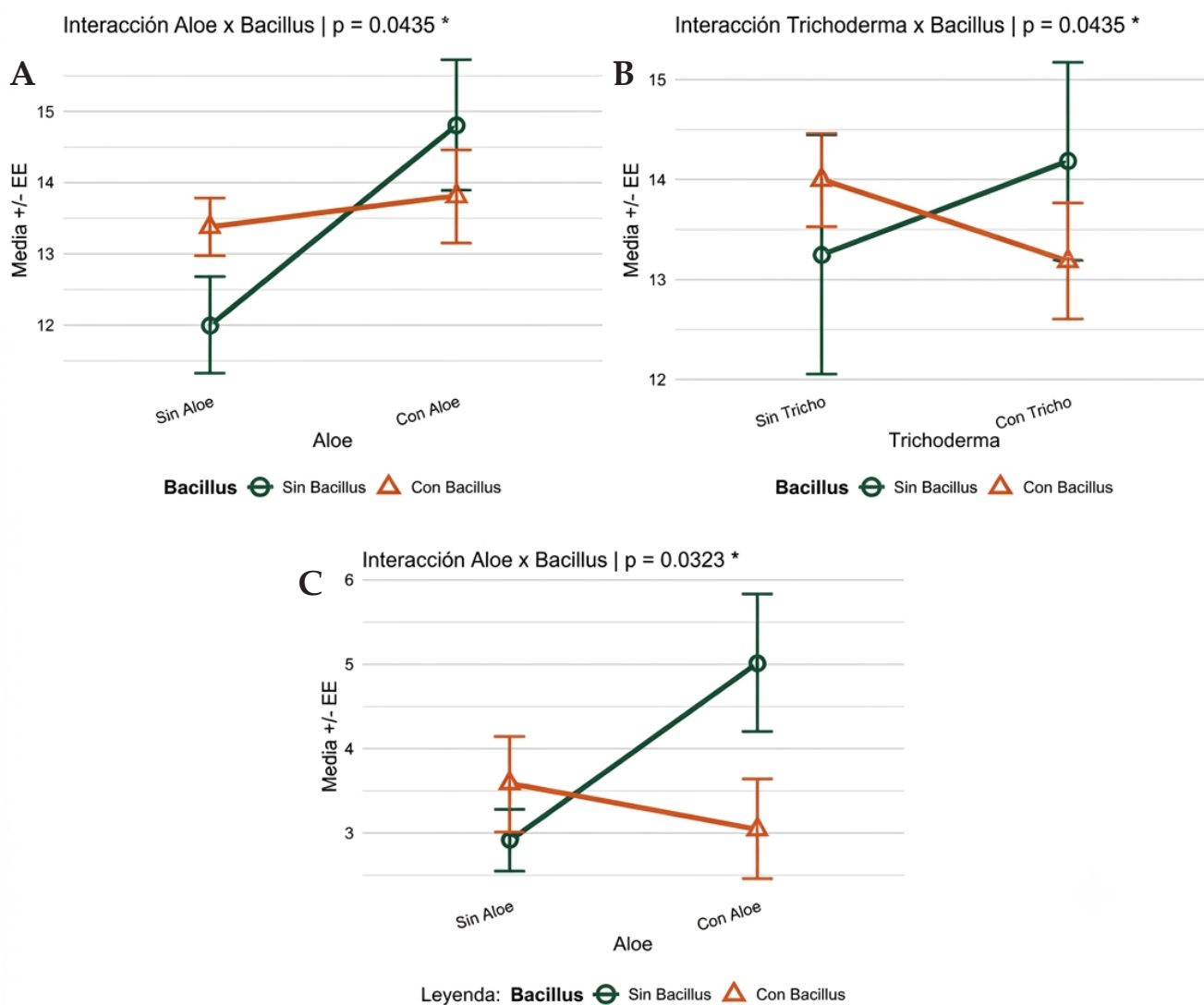


Figura 1. Efecto de la interacción entre bioinsumos sobre el crecimiento de plántulas de *Zea mays* L.: (A) interacción entre *Aloe vera* y *Bacillus* spp. sobre el vigor de plántulas; (B) interacción entre *Trichoderma* spp. y *Bacillus* spp. sobre el vigor de plántulas; y (C) interacción entre *Aloe vera* y *Bacillus* spp. sobre el peso fresco (g) de plántulas.

Para la germinación final, el análisis global entre tratamientos no fue significativo. El modelo quasibinomial no evidenció efectos principales robustos de *Aloe vera* ($p = 0,0950$), *T. harzianum* ($p = 0,7662$) ni *Bacillus* spp. ($p = 0,5769$). Se observó una interacción de tercer orden *Aloe vera* × *T. harzianum* × *Bacillus* spp. ($p = 0,0056$), por lo que los cambios en germinación se interpretaron como dependientes de la combinación específica de factores y no como efectos independientes de cada bioinsumo (**Tabla S2**).

En las variables continuas de crecimiento, los modelos factoriales con corrección robusta HC3 mostraron un efecto significativo de *Aloe vera* sobre altura de plántula ($p < 0,001$), longitud de raíz ($p < 0,001$) y altura aérea ($p = 0,0152$). La longitud de raíz también presentó una interacción *T. harzianum* × *Bacillus* spp. significativa ($p = 0,0203$). Para peso seco, el efecto de *Aloe vera* fue significativo en el modelo clásico ($p = 0,0376$), pero quedó como tendencia bajo la corrección robusta HC3 ($p = 0,0687$). El peso fresco no presentó efectos principales ni interacciones significativas en el análisis factorial (**Tabla S3; Figura 1**).

Discusión

Los resultados obtenidos muestran que el gel de *Aloe vera* al 5 % tuvo un efecto favorable sobre la calidad fisiológica inicial de las plántulas de maíz, especialmente sobre el vigor y las variables de crecimiento temprano. Este patrón es coherente con la composición bioactiva del gel de *Aloe vera*, rico en polisacáridos, aminoácidos, vitaminas, compuestos fenólicos y metabolitos con posible actividad reguladora del crecimiento, los cuales pueden favorecer procesos asociados a la movilización de reservas, la elongación celular y el desarrollo inicial de tejidos radiculares y aéreos (**Sánchez et al., 2020; Catalano et al., 2024; Ushasree et al., 2024; Araque-Pérez, 2025**). Sin embargo, la ausencia de diferencias significativas en la germinación final indica que el efecto observado no debe interpretarse como una mejora general de la capacidad germinativa del lote, sino como una respuesta posterior al inicio de la germinación, vinculada principalmente con el desempeño de las plántulas normales ya establecidas.

La respuesta positiva en altura de plántula, longitud de raíz y altura aérea sugiere que el *Aloe vera* pudo actuar como un bioestimulante temprano, favoreciendo el crecimiento inicial más que el porcentaje final de germinación. Esta distinción es relevante desde el punto de vista agronómico, porque el vigor y el crecimiento radicular temprano suelen relacionarse con una mayor capacidad de exploración del sustrato, establecimiento inicial y tolerancia a condiciones ambientales variables. Además, el uso de una concentración de 5 % resulta compatible con antecedentes que describen respuestas dependientes de la dosis para extractos de *Aloe vera*, con efectos más favorables en rangos bajos o intermedios y posibles respuestas inhibitorias a concentraciones elevadas (**Tucuch-Haas et al., 2022; Sousa Neto et al., 2024; Assunção et al., 2025**). Por ello, los resultados respaldan el potencial del *Aloe vera* al 5 % como tratamiento inicial de semillas, aunque no permiten inferir una curva dosis-respuesta ni definir una concentración óptima.

A diferencia de lo observado para *Aloe vera*, los bioinsumos microbianos evaluados no mostraron efectos principales consistentes sobre el crecimiento temprano de las plántulas en el modelo factorial corregido. Esta respuesta no necesariamente contradice el potencial promotor del crecimiento descrito para *T. harzianum* y *Bacillus* spp., sino que pone de manifiesto que su efecto puede depender fuertemente del contexto experimental, del tiempo de evaluación, de la formulación comercial, de la viabilidad posterior al tratamiento y del ambiente en el que se expresa la interacción planta-microorganismo. En ensayos de laboratorio sobre papel germitest, la ausencia de suelo y de una microbiota rizosférica compleja puede limitar algunos mecanismos típicos de promoción del crecimiento, como la solubilización de nutrientes, la competencia microbiana o la inducción de respuestas sistémicas. Por esta razón, los resultados obtenidos deben considerarse representativos de la fase temprana bajo condiciones controladas, y no necesariamente extrapolables de forma directa a condiciones de invernadero o campo.

El reanálisis de vigor y germinación mediante modelos binomiales y quasibinomiales permitió resolver una de las principales ambigüedades estadísticas del estudio. En vigor, el efecto de *Aloe vera* se mantuvo significativo después de ajustar por sobredispersión, mientras que las interacciones de segundo orden quedaron como tendencias de modulación. Este resultado sugiere que la combinación de *Aloe vera* con *Bacillus* spp. o *T. harzianum* puede alterar la magnitud de la respuesta fisiológica, pero no permite concluir la existencia de antagonismo biológico en sentido estricto. En germinación, la interacción de tercer orden observada indica que las respuestas dependen de combinaciones específicas de factores y no de efectos independientes de cada bioinsumo. Dado el tamaño muestral reducido y la ausencia de ensayos de compatibilidad *in vitro*, estas interacciones deben interpretarse como patrones exploratorios que justifican nuevas evaluaciones, más que como evidencia concluyente de sinergia o antagonismo.

Desde el punto de vista tecnológico, el presente estudio apoya el uso del gel de *Aloe vera* como matriz natural de tratamiento de semillas y como bioestimulante vegetal temprano, pero no demuestra de forma directa su función como adhesivo. Esta distinción es central para interpretar el alcance del trabajo y responder a las limitaciones metodológicas del ensayo. Para validar una función adherente sería necesario incorporar métricas específicas de desempeño del recubrimiento, tales como ganancia de masa, uniformidad de cobertura, desprendimiento de polvo, fuerza de adhesión, tiempo de secado, retención de inoculantes y recuperación microbiana viable después del secado. Asimismo, la falta de identificación de cepas, recuentos viables independientes, control adhesivo inerte y curva dosis-respuesta limita la atribución mecanística de los efectos observados. En conjunto, los resultados deben entenderse como una primera aproximación experimental que identifica un efecto bioestimulante temprano del *Aloe vera* y plantea hipótesis tecnológicas para estudios posteriores con mayor control microbiológico, físico y agronómico.

Conclusiones

El gel de *Aloe vera* al 5 % favoreció el vigor y el crecimiento inicial de plántulas de maíz, evidenciado por incrementos en la altura de plántula, longitud de raíz y desarrollo aéreo bajo condiciones controladas. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas en la germinación final ni en el peso fresco, mientras que el efecto sobre el peso seco mostró menor consistencia tras el análisis de sensibilidad. Las combinaciones con *T. harzianum* y *Bacillus* spp. sugirieron posibles efectos moduladores, aunque sin evidencia concluyente de sinergia o antagonismo. Respaldando el potencial bioestimulante del *Aloe vera* y justifican futuras validaciones en condiciones de campo.

Declaración de conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés financieros, personales ni profesionales que puedan haber influido de forma inapropiada en la realización o interpretación de los resultados del presente estudio.

Contribución de los autores

A.B.P.M., conceptualización, metodología, supervisión del estudio, coordinación experimental y redacción del manuscrito. **J.R.C.P.**, diseño experimental, análisis estadístico, procesamiento de datos, programación en RStudio y la interpretación de resultados.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los estudiantes colaboradores y al personal técnico de la Dirección de Investigación de la Facultad de Ingeniería Agronómica de la Universidad Nacional del Este (FIA-UNE) por su valiosa participación en la instalación experimental y soporte técnico. Este trabajo se enmarca en el proyecto Resolución N.º 368/2023 "Protocolo de Implementación del Laboratorio de Patología de Semillas".

Referencia

- Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian, S., & Smith, D. L. (2018). Plant growth-promoting microbes: Endophytes, rhizosphere bacteria, and fungi. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
- Bashan, Y., de-Bashan, L. E., Prabhu, S. R., & Hernandez, J. P. (2014). Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology. *Plant and Soil*, 378(1–2), 1–33. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1956-9>
- Bulgari, R., Franzoni, G., & Ferrante, A. (2019). Biostimulants application in horticultural crops under abiotic stress conditions. *Agronomy*, 9(6), 306. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060306>
- Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 383, 3–41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2137-1>
- Catalano, A., Iacopetta, D., Ceramella, J., Mariconda, A., Scali, E., Bonomo, M. G., Aquaro, S., Longo, P., & Sinicropi, M. S. (2024). *Aloe vera* bioactive compounds and applications: A dynamic review. *Foods*, 13(13), 2155. <https://doi.org/10.3390/foods13132155>
- Chandran, H., Meena, M., & Sharma, K. (2020). Plant growth promoting effects of *Aloe vera* extracts. *Journal of Plant Science and Research*, 7(2), 1–8.
- du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, and characterization. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
- Eshun, K., & He, Q. (2004). *Aloe vera*: A valuable ingredient for the food, pharmaceutical and cosmetic industries. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 44(2), 91–96. <https://doi.org/10.1080/10408690490424694>

- Gupta, G., Parihar, S. S., Ahirwar, N. K., Snehi, S. K., & Singh, V. (2015). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Current and future prospects for development of sustainable agriculture. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 25(12), 2045–2057. <https://doi.org/10.4014/jmb.1505.05049>
- Harman, G. E., Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I., & Lorito, M. (2004). Trichoderma species—opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nature Reviews Microbiology*, 2, 43–56. <https://doi.org/10.1038/nrmicro797>
- Hernández-Herrera, R. M., Santacruz-Ruvalcaba, F., Ruiz-López, M. A., Norrie, J., & Hernández-Carmona, G. (2014). Effect of seaweed extracts on plant growth. *Journal of Applied Phycology*, 26, 619–628. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0065-1>
- Lephatsi, M., Meyer, V., Piater, L. A., Dubery, I. A., & Tugizimana, F. (2022). Plant growth-promoting bacteria in maize: Mechanisms, applications, and perspectives. *Scientific Reports*, 12, 14570. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14570-7>
- Ocwa, A., Mohammed, S., & Rátonyi, T. (2024). Biostimulants effect on maize yield and quality: A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24, 1609–1649. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01687-z>
- Prasad, R., Singh, A., Kumar, M., Mukherjee, P. K., Varma, A., & Sharma, A. K. (2019). Biofertilizers and biostimulants in agriculture: A review. In *Sustainable Agriculture Reviews* (Vol. 35, pp. 1–40). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16502-2_1
- Radhakrishnan, R., & Lee, I. J. (2016). Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications. *Applied Soil Ecology*, 105, 155–165. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.04.001>
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Biostimulants in agriculture: A reviewing overview of concepts, and types. *Frontiers in Plant Science*, 11, 40. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040>
- Sánchez, J., Pérez, M., & López, R. (2020). Biological properties and applications of Aloe vera: A review. *Journal of Ethnopharmacology*, 248, 112345. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2019.112345>
- Santoyo, G., Guzmán-Guzmán, P., Parra-Cota, F. I., Santos-Villalobos, S. d. I., & Orozco-Mosqueda, M. d. C. (2024). Microbial interactions in plant growth promotion. *Frontiers in Microbiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1423980>
- Shameer, S., & Prasad, T. N. V. K. V. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria mechanisms. *Journal of Plant Growth Regulation*, 37, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00344-017-9750-5>
- Sible, C. N., Seebauer, J. R., & Below, F. E. (2021). Plant biostimulants: A review of their definition, categorization, and benefits in maize. *Agronomy*, 11(7), 1297. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071297>
- Surjushe, A., Vasani, R., & Saple, D. G. (2008). Aloe vera: A short review. *Indian Journal of Dermatology*, 53(4), 163–166. <https://doi.org/10.4103/0019-5154.44785>
- Tsotetsi, T., Nchu, F., Shoko, T., Meyer, V., & Tugizimana, F. (2022). Bacillus spp. plant growth promotion: Mechanisms and applications in sustainable agriculture. *Plants*, 11(19), 2482. <https://doi.org/10.3390/plants11192482>
- Ushasree, M. V., Nampoothiri, K. M., & Pandey, A. (2024). Aloe vera metabolites and their bioactivity in plant growth and health. *Biotechnology Advances*, 72, 108325. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2024.108325>
- Vessey, J. K. (2003). Plant growth-promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*, 255, 571–586. <https://doi.org/10.1023/A:1026037216893>
- Woo, S. L., Hermosa, R., Lorito, M., & Monte, E. (2023). Trichoderma mechanisms in plant health and disease. *Nature Reviews Microbiology*, 21. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00819-5>
- Yakhin, O. I., Lubyantsev, A. A., Yakhin, I. A., & Brown, P. H. (2017). Biostimulants in plant science: A global perspective. *Frontiers in Plant Science*, 7, 2049. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049>
- Zuluaga, J. A., Arca, G., López, R., Ruiz, M., & Pérez, M. (2021). Plant-microbe interactions in agriculture: Potential of beneficial bacteria and fungi for plant growth promotion and disease resistance. *Microbiological Research*, 247, 126723. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126723>