






Evaluación del comportamiento hidráulico de doce modelos de goteros autocompensados en sistemas de riego presurizado

Evaluation of the hydraulic performance of twelve self-regulating dripper models in pressurized irrigation systems

Alanys Molina-López^{1*} , Homero Bermúdez-Cevallos¹ , Galo Cedeño-García¹ ,

Saskia Guillen-Mendoza¹ 

RESUMEN

El presente estudio evaluó el efecto de un bioactivador aplicado a semillas sobre la germinación y el crecimiento temprano de plántulas de maíz INIAP 543-QPM. El experimento se desarrolló bajo condiciones controladas en el laboratorio de fitotecnia de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, en Calceta, Manabí, Ecuador. Se empleó un diseño completamente aleatorizado con tres tratamientos: semillas previamente hidratadas y tratadas con bioactivador (T1), semillas secas tratadas con bioactivador (T2) y un control sin hidratación ni bioactivador (T3), con siete réplicas y dos ciclos de evaluación independientes. Se analizaron el porcentaje de germinación, emergencia, índice de velocidad de germinación, índice de velocidad de emergencia, longitud de plántula, longitud radical y masa seca. Los tratamientos con bioactivador incrementaron significativamente la germinación, con valores promedio de 97.00 % en T1 y 95.21 % en T2, superiores al control. T1 presentó el mejor desempeño general, con mayores porcentajes de emergencia e incrementos consistentes en velocidad de germinación, velocidad de emergencia, longitud de plántula, longitud radical y masa seca en ambos ciclos. Aunque T2 también superó al control, su respuesta fue menor que la obtenida con hidratación previa. Los resultados evidencian que la hidratación previa potencia el efecto del bioactivador; sin embargo, el alcance del estudio se limita a condiciones controladas y fases iniciales del cultivo, esta práctica puede contribuir a mejorar la uniformidad, rapidez y vigor temprano del maíz.

Palabras clave: bioactivador, germinación, maíz, hidratación de semillas, crecimiento temprano.

ABSTRACT

This study evaluated the effect of a bioactivator applied to seeds on the germination and early growth of INIAP 543-QPM corn seedlings. The experiment was conducted under controlled conditions in the plant science laboratory of the Manuel Félix López Higher Polytechnic School of Agriculture and Livestock in Manabí, located in Calceta, Manabí, Ecuador. A completely randomized design was used with three treatments: seeds pre-hydrated and treated with a bioactivator (T1), dry seeds treated with a bioactivator (T2), and a control without hydration or bioactivator (T3), with seven replicates and two independent evaluation cycles. The following parameters were analyzed: germination percentage, emergence, germination rate index, emergence rate index, seedling length, root length, and dry mass. The treatments with bioactivator significantly increased germination, with average values of 97.00% in T1 and 95.2 % in T2, higher than the control. T1 showed the best overall performance, with higher emergence percentages and consistent increases in germination rate, emergence rate, seedling length, root length, and dry weight in both cycles. Although T2 also outperformed the control, its response was lower than that obtained with pre-hydration. The results show that pre-hydration enhances the effect of the bioactivator; however, the scope of the study is limited to controlled conditions and the early stages of the crop, this practice may contribute to improving the uniformity, speed, and early vigor of maize.

Keywords: bioactivator, germination, maize, seed hydration, early growth.

¹Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Calceta, Ecuador.

*Autor de correspondencia. E-mail: gcedeno@espa.edu.ec

I. INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) constituye uno de los cultivos de mayor importancia estratégica para los sistemas agroalimentarios, debido a su uso como alimento humano, insumo para alimentación animal y materia prima para diversos procesos agroindustriales. A escala global, su relevancia se ha incrementado por la expansión de la demanda, el crecimiento del comercio agrícola y la necesidad de fortalecer la productividad en contextos de intensificación sostenible. En este escenario, el maíz no solo representa un cultivo de alto valor económico, sino también una especie clave para la seguridad alimentaria y la estabilidad de cadenas productivas en países del Sur Global, donde las mejoras en rendimiento, eficiencia de insumos y establecimiento temprano siguen siendo prioridades de investigación y desarrollo (Erenstein et al., 2022). Asimismo, la producción mundial de cereales aumentó entre 2022 y 2023, impulsada principalmente por el incremento de la producción de maíz, mientras que maíz, trigo y arroz concentraron el 91 % de la producción cerealera global en 2023.

En Ecuador, el maíz duro seco mantiene una importancia productiva considerable, especialmente en la Región Costa. Sin embargo, las estadísticas recientes muestran señales de tensión en el desempeño del cultivo: en 2024, la superficie en cosechada nacional de maíz duro seco fue de 273 835 ha, con una disminución de 14.8 % respecto de 2023; además, la producción alcanzó 1.1 millones de toneladas, registrando una reducción interanual de 15.4 %. Las provincias de Manabí, Los Ríos y Guayas concentraron el 82.5 % de la superficie cosechada, lo que evidencia la relevancia territorial del cultivo y la necesidad de fortalecer prácticas agronómicas que mejoren su establecimiento inicial.

Uno de los problemas críticos en la producción de maíz se relaciona con la fase inicial del cultivo, particularmente con la germinación, la emergencia y el vigor temprano de las plántulas. Una emergencia lenta, desuniforme o con bajo desarrollo radical puede reducir la población efectiva de plantas, limitar la exploración temprana del suelo y afectar la capacidad inicial del cultivo para absorber agua y nutrientes.

Estas limitaciones pueden tener consecuencias productivas y económicas, debido a que una mala implantación compromete la uniformidad del cultivo y puede incrementar la necesidad de resiembra, manejo correctivo o mayor uso de insumos. Por ello, las estrategias dirigidas a mejorar la calidad fisiológica de la semilla y el desarrollo temprano de plántulas adquieren relevancia dentro de una agricultura más eficiente y sostenible.

En los últimos años, los bioestimulantes y los tratamientos de semilla han sido estudiados como herramientas para mejorar la respuesta fisiológica de los cultivos. Li et al. (2022), mediante un metaanálisis con más de mil pares de datos procedentes de 180 estudios de campo, señalaron que la efectividad de los bioestimulantes depende del tipo de producto, método de aplicación, especie cultivada y condiciones edafoclimáticas. En maíz, Capo et al. (2023) indicaron que las estrategias orientadas a mejorar el vigor inicial, como el tratamiento de semilla con bioestimulantes, pueden contribuir al crecimiento temprano y a beneficios agronómicos posteriores. De manera complementaria, Ujvári et al. (2023) destacaron que el manejo inicial del cultivo puede influir en la rizósfera, la fertilidad biológica y la resiliencia del sistema productivo.

Dentro de estas estrategias, el *seed priming* o acondicionamiento previo de semillas ha recibido especial atención porque permite activar procesos pregerminativos sin completar la emergencia de la radícula. Gohari et al. (2026) explican que el priming puede incluir hidropriming, osmopriming, biopriming, priming nutricional y nanopriming, con efectos sobre la germinación, la uniformidad, el vigor y la tolerancia a estreses abióticos. En maíz, Ellouzi et al. (2024) demostraron que el priming con auxina mejoró la dinámica de germinación, el establecimiento temprano y el estado hídrico de plántulas sometidas a estrés salino, asociado con mayor actividad de α -amilasa, metabolismo de carbohidratos y detoxificación de especies reactivas de oxígeno. Asimismo, Kasana et al. (2025) reportaron que el priming con glutatión y zinc incrementó la germinación, la emergencia y el vigor

de plántulas de maíz bajo salinidad, evidenciando el papel de los micronutrientes y compuestos bioactivos en la activación metabólica temprana.

No obstante, la literatura reciente muestra diferencias importantes en los enfoques evaluados. Algunos estudios se han concentrado en bioestimulantes microbianos, fertilización de arranque, extractos vegetales o tratamientos aplicados bajo estrés abiótico; otros han priorizado variables de rendimiento en campo más que indicadores fisiológicos iniciales. Aunque estos aportes confirman el potencial de los tratamientos de semilla, aún existe un vacío específico respecto al efecto comparativo de un bioactivador mineral aplicado sobre semillas previamente hidratadas frente a su aplicación directa sobre semillas secas, especialmente en variedades de maíz de interés regional y bajo condiciones controladas de germinación, emergencia y crecimiento temprano.

En ese contexto, el presente estudio se delimita al análisis del efecto de un bioactivador compuesto por boro, manganeso, molibdeno y zinc, aplicado a semillas de maíz INIAP 543-QPM bajo dos modalidades: semillas previamente hidratadas y tratadas con bioactivador, y semillas secas tratadas directamente con bioactivador, en comparación con un control sin hidratación ni bioestimulación. La investigación se desarrolló bajo un diseño completamente aleatorizado, con tres tratamientos, siete réplicas y dos ciclos de evaluación independientes, lo que permite valorar la consistencia de la respuesta experimental en variables de germinación, emergencia, velocidad de respuesta y crecimiento temprano.

La evaluación resulta necesaria porque la eficacia de los bioactivadores puede variar según el método de aplicación, el estado hídrico inicial de la semilla, la composición del producto y el genotipo utilizado (INEC 2025). En consecuencia, no basta con asumir que la aplicación de un bioactivador produce siempre la misma respuesta fisiológica; es necesario determinar si la hidratación previa potencia su efecto o si la aplicación directa sobre semilla seca resulta suficiente para mejorar el desempeño inicial del cultivo. Este aspecto es relevante para generar recomendaciones agronómicas más precisas, prácticas y proporcionales

al contexto productivo.

Se planteó como hipótesis que la aplicación del bioactivador mejora el potencial germinativo y el crecimiento temprano de plántulas de maíz, y que dicho efecto es mayor cuando el producto se aplica sobre semillas previamente hidratadas. Por tanto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de un bioactivador aplicado a semillas sobre el potencial germinativo y el crecimiento temprano de plántulas de maíz INIAP 543-QPM. El aporte esperado consiste en generar evidencia experimental sobre una práctica de tratamiento de semilla orientada a mejorar la uniformidad, rapidez de emergencia y vigor inicial del cultivo, sin extender sus conclusiones más allá de la fase temprana evaluada.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El experimento se desarrolló en el laboratorio de fitotecnia de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, ubicada en Calceta, Manabí, Ecuador. El sitio experimental se localizó en las coordenadas geográficas 0°49'35"S 80°11'11"O, a una altitud de 158 msnm, con temperatura promedio anual de 25.5 °C, precipitaciones promedio de 1300 mm anuales, humedad relativa de 80 % y una heliofanía de 1038 horas anuales.

Material vegetal y experimental

Como material vegetal se utilizaron semillas certificadas de la variedad de maíz INIAP 543-QPM. La composición del bioactivador de semillas fue de boro (0.13 %), manganeso (5.2 %), molibdeno (0.0 %) y zinc (0.4 %).

Tratamientos, diseño y unidad experimental

Se evaluaron tres tratamientos que fueron: T1 = semillas previamente hidratadas y tratadas con bioactivador; T2 = semillas secas tratadas con bioactivador; y T3 = control sin hidratación ni bioactivador. Se utilizó un diseño completamente aleatorizado con tres tratamientos, siete réplicas y 21 unidades experimentales. La unidad experimental se conformó por grupos de 25 semillas para las pruebas de germinación en papel y 50 semillas para la prueba de emergencia y vigor en sustrato. El experimento se

repitió en dos ciclos de evaluación independientes con el propósito de verificar la consistencia de la respuesta experimental; por ello, los resultados se analizaron y presentaron por ciclo.

Aplicación de tratamientos

En T1, las semillas se remojaron en agua destilada estéril durante 24 h; posteriormente, se aplicó el bioactivador en dosis de 50 mL por 20 kg de semilla antes de la siembra. En T2, el bioactivador se aplicó directamente sobre semillas secas al momento de la siembra, empleando la misma dosis utilizada en T1; mientras que las semillas del tratamiento control T3 se sembraron directamente, sin ningún tratamiento de remojo ni bioestimulación.

Variables de respuesta de germinación

Índice de velocidad de germinación (IVG)

Se determinó mediante la prueba de germinación estándar (ISTA, 2016), utilizando el método 'entre papel', el cual consistió en colocar 25 semillas distribuidas en cinco columnas y cinco hileras, sobre dos láminas de papel toalla previamente humedecidas con agua destilada estéril, posteriormente se cubrieron con dos láminas más de papel toalla humedecido y se enrollaron en forma de cigarro, los cuales se introdujeron en cámara de germinación a 25 °C durante 7 días. Se realizaron conteos diarios del número de semillas germinadas, considerando semillas con la radícula brotada.

El cálculo del IVG se realizó mediante la ecuación: $IVG = \sum (Gi / Ti)$, donde Gi corresponde al número de semillas germinadas en el día i y Ti al tiempo transcurrido desde la siembra hasta dicho conteo.

Porcentaje de germinación (PG)

El porcentaje de germinación (PG) se calculó mediante la expresión: $PG = (\text{número total de semillas germinadas} / \text{número total de semillas evaluadas}) \times 100$.

Variables de respuesta de emergencia y vigor

Se determinaron siguiendo las metodologías de Martínez et al. (2010) y Gámez et al. (2017). Para esto, la siembra se realizó en bandejas germinadoras de 50 alvéolos, se usó turba estéril como sustrato; se sembró a dos centímetros de profundidad, se aplicaron riegos homogéneos durante quince días de

prueba, la temperatura osciló entre 24 y 26 °C durante el periodo de evaluación.

Índice de velocidad de emergencia (IVE)

Se llevaron a cabo conteos diarios del número de plántulas emergidas, considerando como primer día aquél en que se observó la primera plántula emergida; el final del conteo fue a quince días después del establecimiento del experimento. El IVE se calculó mediante la ecuación: $IVE = \sum (Ei / Ti)$, donde Ei corresponde al número de plántulas emergidas en el día i y Ti al tiempo transcurrido desde la siembra hasta dicho conteo.

Porcentaje de emergencia (%)

Al finalizar la prueba se dividió el número total de plántulas emergidas entre el número total de semillas y se multiplicó por 100 para expresar el resultado en porcentaje.

Longitud de plántula (cm)

Se midió en 10 plántulas seleccionadas al azar por repetición, desde el cuello de la raíz hasta el ápice de la última hoja.

Longitud de raíz (cm)

Se registró en 10 plántulas tomadas al azar de cada repetición, considerando la medición en centímetros desde el cuello de la raíz hasta el ápice de la misma.

Masa seca de plántula (g)

Las plántulas utilizadas para las mediciones de longitud se secaron en estufa a 80 °C durante 72 h; posteriormente, se determinó su masa seca con una balanza analítica de precisión.

Análisis de datos

Los datos fueron sometidos a análisis de varianza de una vía (ANOVA) por ciclo de evaluación. Cuando se detectaron diferencias significativas, las medias se compararon mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia de $p \leq 0.05$. El análisis se realizó con InfoStat versión 2020.

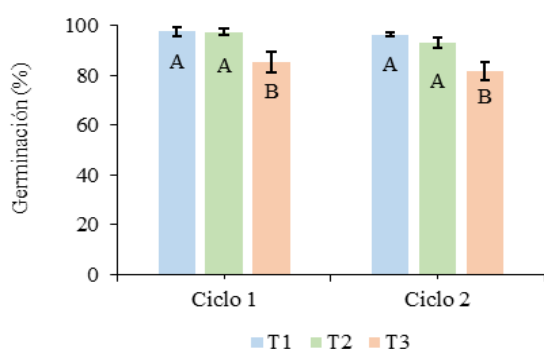
III. RESULTADOS

Los tratamientos evaluados influyeron significativamente ($p < 0.05$) en la germinación de semillas de maíz en ambos ciclos de evaluación. Ambos tratamientos de bioestimulación, tanto el previamente hidratado (T1) como el aplicado directamente sobre semillas en secas (T2), lograron

valores promedio de 97.00 y 95.21% de germinación, lo que representa un incremento del 13.91 y 12.30% con respecto al tratamiento control (T3) sin bioestimulación (Figura 1). Los tratamientos T1 y T2 presentaron valores de germinación estadísticamente superiores al control, lo que evidencia un efecto positivo de la bioactivación sobre esta variable.

Figura 1. Efecto de los tratamientos de bioactivación sobre la germinación (%) de semillas de maíz INIAP 543-QPM en dos ciclos de evaluación.

La emergencia de plántulas fue afectada de manera



significativa ($p < 0.05$) por los tratamientos de bioestimulación probados en ambos ciclos de evaluación (Figura 2). La aplicación del bioactivador a la semilla previamente hidratada (T1) logró la mayor emergencia de plántulas normales, con un incremento del 3.32 y 15.71%, con relación al tratamiento con bioestimulación sin remojo de semillas (T2) y el tratamiento control (T3) en el ciclo 1. Tendencia similar se presentó para el ciclo 2, donde el tratamiento (T1) logró la mayor emergencia de plántulas, con un aumento del 6.32 y 15.11% con respecto a los tratamientos T2 y T3 (Figura 2). Los valores de emergencia fueron superiores en los tratamientos con bioactivador respecto del control; además, T1 mostró la mayor respuesta numérica y estadística en ambos ciclos.

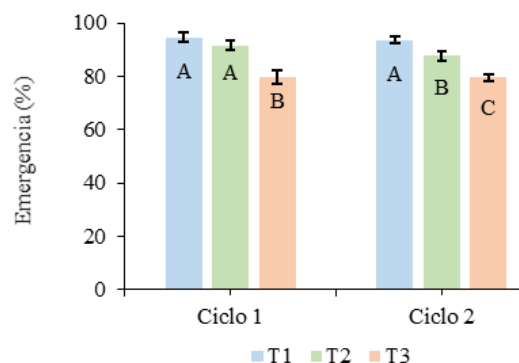


Figura 2. Efecto de los tratamientos de bioactivación sobre la emergencia (%) de plántulas de maíz INIAP 543-QPM en dos ciclos de evaluación.

El índice de velocidad de germinación (IVG) y el índice de velocidad de emergencia (IVE) fueron influenciados significativamente ($p < 0.05$) por los tratamientos de bioactivación de semillas, den el cual la aplicación del bioactivador después del remojo previo de la semilla (T1) logró los mayores valores promedios, con relación a los tratamientos T2 y T3 con menor IVG y IVE (Figuras 3 y 4). En cuanto al IVG el tratamiento T1 produjo un aumento de 12.59 y 38.56% en el ciclo 1, y de 12.11 y 33.21% para el ciclo 2, con relación a los tratamientos T2 y T3, respectivamente (Figura 3). Una tendencia similar se presentó para el IVE, donde el tratamiento T1 logró un aumento del 16.44 y 32.02% en el ciclo 1 y del 14.75 y 30.43% para el ciclo 2, con respecto a los tratamientos T2 y T3, en ese orden respectivo (Figura 4).

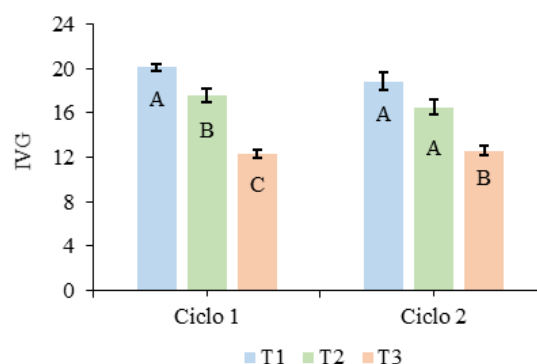


Figura 3. Efecto de los tratamientos de bioactivación sobre el índice de velocidad de germinación (IVG) de semillas de maíz INIAP 543-QPM.

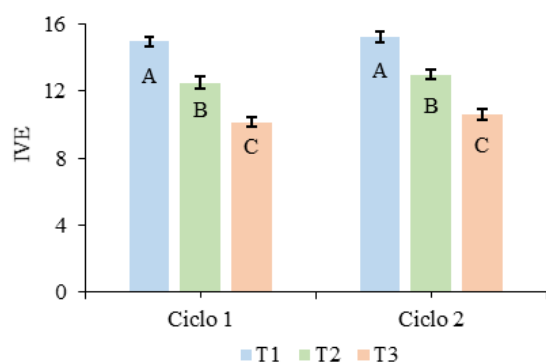


Figura 4. Efecto de los tratamientos de bioactivación sobre el índice de velocidad de emergencia (IVE) de plántulas de maíz INIAP 543-QPM.

Las variables de crecimiento, longitud de plántula (LP), longitud radical (LR) y masa seca de plántula (MSP), fueron afectadas significativamente ($p < 0.05$) por los tratamientos de bioactivación en ambos ciclos de evaluación. El tratamiento T1 registró los mayores valores promedio de LP, LR y MSP en ambos ciclos

de evaluación (Tabla 1). La LP fue incrementada por el T1 en un 16.21 y 33.81 %, con respecto a los tratamientos T2 y T3 en el primer ciclo de prueba, mientras que, para el segundo ciclo, el aumento provocado por el T1 fue de 14.61 y 26.98 % con relación a T2 y T3, respectivamente.

Efecto similar se presentó para la LR, donde el T1 logró un aumento del 15.89 y 35.44 % en el ciclo 1, y del 15.25 y 30.51 % para el ciclo 2, con relación a los tratamientos T2 y T3, respectivamente. El T1 también indujo una mayor acumulación de MSP con respecto a los tratamientos T2 y T3, con incrementos del 15.28 y 26.39 % y 14.29 y 27.27 % para los ciclos 1 y 2, respectivamente. En conjunto, los resultados muestran que el tratamiento T1 presentó el mejor desempeño en germinación, emergencia, velocidad de respuesta y crecimiento temprano de plántulas

Tabla 1. Efecto de los tratamientos de bioactivación sobre la longitud de plántula (LP), longitud radical (LR) y masa seca de plántula (MSP) de maíz INIAP 543-QPM.

Tratamientos	LP (cm)	LR (cm)	MSP (g)
Ciclo 1			
T1	20.29 a	27.00 a	0.72 a
T2	17.00 b	22.71 b	0.61 b
T3	13.43 c	17.43 c	0.53 c
p-valor ANOVA	0.0001	0.0001	0.0001
CV %	7.76	6.77	5.08
Ciclo 2			
T1	19.57 a	27.14 a	0.77 a
T2	16.71 b	23.00 b	0.66 b
T3	14.29 c	18.86 c	0.56 c
p-valor ANOVA	0.0001	0.0001	0.0001
CV %	7.27	7.07	6.69

Nota. Medias con letras distintas dentro de una misma columna y ciclo difieren significativamente según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). CV: coeficiente de variación.

IV. DISCUSIÓN

La germinación constituye una fase crítica en el establecimiento inicial del maíz, debido a que condiciona la uniformidad de emergencia, el vigor temprano de las plántulas y la capacidad inicial del cultivo para aprovechar agua y nutrientes. En la presente investigación, la aplicación del bioactivador favoreció significativamente la germinación de semillas de maíz INIAP 543-QPM en ambos ciclos de evaluación, especialmente en los tratamientos T1 y T2, los cuales superaron al control sin bioestimulación. Este comportamiento evidencia que la incorporación de compuestos bioactivos en la semilla puede estimular procesos fisiológicos vinculados con la reactivación metabólica temprana, favoreciendo una respuesta germinativa más eficiente frente a semillas no tratadas. Este resultado es coherente con lo señalado por Gohari et al. (2026), quienes indican que el priming o tratamiento previo de semillas activa procesos pregerminativos, mejora la uniformidad de germinación y favorece el establecimiento inicial de las plántulas.

El incremento observado en la germinación podría explicarse por la acción conjunta de la hidratación previa y de los micronutrientes presentes en el bioactivador, particularmente boro, manganeso, molibdeno y zinc. Estos elementos participan en procesos relacionados con la actividad enzimática, la síntesis de proteínas, la regulación hormonal, la movilización de reservas y el mantenimiento del metabolismo celular durante la germinación. En esa línea, Gohari et al. (2026) sostienen que el priming nutricional con elementos como zinc, boro, molibdeno y manganeso puede favorecer la absorción inicial, el crecimiento de plántulas y el desarrollo radical. Asimismo, Kasana et al. (2025) demostraron que el tratamiento de semillas de maíz con zinc, especialmente cuando se combina con otros compuestos bioactivos, mejora los atributos de germinación y emergencia bajo condiciones de estrés. Por ello, la mayor respuesta observada en T1 puede atribuirse a que la hidratación previa facilitó la absorción y disponibilidad temprana de los componentes del bioactivador.

La emergencia de plántulas también fue favorecida por los tratamientos de bioactivación, destacando T1 como el tratamiento de mejor desempeño en ambos ciclos. Esta variable es relevante porque no solo refleja la capacidad de la semilla para germinar, sino también su aptitud para producir una plántula normal y funcional bajo condiciones de sustrato. La superioridad de T1 frente a T2 y T3 sugiere que la hidratación previa, combinada con el bioactivador, pudo acelerar la reactivación fisiológica del embrión y mejorar la transición desde la germinación hasta la emergencia visible de la plántula. Este comportamiento coincide con Ellouzi et al. (2024), quienes reportaron que el priming de semillas de maíz mejoró los índices de germinación y el establecimiento temprano de plántulas, especialmente al modular procesos fisiológicos vinculados con el metabolismo de carbohidratos y la detoxificación de especies reactivas de oxígeno.

Desde una interpretación técnica, la mayor emergencia observada en T1 puede atribuirse a una mejor sincronización entre imbibición, activación enzimática y crecimiento inicial del eje embrionario. La hidratación previa permite que la semilla inicie procesos metabólicos antes de la siembra, mientras que el bioactivador podría reforzar dichos procesos mediante el aporte de micronutrientes esenciales. En contraste, el tratamiento T2, aunque recibió el bioactivador, dependió de la humedad disponible después de la siembra para activar completamente la imbibición y los procesos metabólicos asociados. Esta diferencia permite explicar por qué T2 tuvo una respuesta positiva frente al control, pero menor que T1. Según la FAO (2024), el priming puede mejorar el desempeño germinativo del maíz, aunque la magnitud de la respuesta depende del genotipo, del agente aplicado y de las condiciones de evaluación. El índice de velocidad de germinación y el índice de velocidad de emergencia mostraron una respuesta consistente con los porcentajes finales de germinación y emergencia. En ambos casos, T1 alcanzó los mayores valores, seguido por T2, mientras que el control presentó el menor desempeño. Esta respuesta es importante porque la velocidad no solo expresa

cuántas semillas germinan o emergen, sino también qué tan rápido lo hacen. En sistemas agrícolas, una germinación y emergencia más rápidas pueden traducirse en mayor uniformidad del cultivo, menor exposición de las semillas a condiciones desfavorables y mejor capacidad inicial de competencia de las plántulas. Estos hallazgos guardan relación con lo descrito por Gohari et al. (2026), quienes señalan que el priming favorece la germinación rápida, la uniformidad y el vigor inicial mediante la activación de procesos enzimáticos, respiratorios y de reparación celular.

La respuesta superior de T1 en IVG e IVE sugiere que la hidratación previa actuó como un factor complementario al bioactivador, favoreciendo una activación fisiológica más temprana. Este efecto puede estar relacionado con una mayor disponibilidad inicial de agua en los tejidos seminales, condición necesaria para activar enzimas hidrolíticas, movilizar reservas y estimular el crecimiento de la radícula. En este sentido, Meng et al. (2022) demostraron que la germinación del maíz está estrechamente vinculada con el metabolismo antioxidante, la disponibilidad energética y la posterior capacidad de crecimiento de las plántulas. Por tanto, la mayor velocidad observada en T1 no debe interpretarse únicamente como un efecto del bioactivador, sino como el resultado de una interacción favorable entre hidratación previa, absorción de compuestos activos y activación metabólica temprana.

Las variables de crecimiento temprano, representadas por la longitud de plántula, longitud radical y masa seca de plántula, confirmaron el efecto positivo de la bioactivación sobre el vigor inicial del maíz. El tratamiento T1 registró los mayores valores en ambos ciclos, mientras que T2 mostró un comportamiento intermedio y T3 presentó los valores más bajos. Esta tendencia evidencia que el beneficio del bioactivador no se limitó al inicio de la germinación, sino que se extendió hacia el desarrollo inicial de estructuras vegetativas y radicales. Capo et al. (2023) reportaron que el tratamiento de semilla con bioestimulante en maíz incrementó la altura, el área foliar y la biomasa de raíces y brotes frente a semillas no tratadas, lo

que respalda la tendencia observada en la presente investigación.

El mayor crecimiento radical observado en T1 resulta particularmente relevante, debido a que una raíz más desarrollada durante las primeras etapas puede mejorar la exploración del sustrato, la absorción de agua y nutrientes, y la estabilidad inicial de la plántula. Asimismo, el incremento de masa seca sugiere una mayor acumulación de biomasa, posiblemente asociada con una utilización más eficiente de las reservas seminales y una mejor actividad fisiológica temprana. Este comportamiento es consistente con Ganugi et al. (2022), quienes indicaron que los tratamientos de semilla con bioestimulantes microbianos en maíz pueden modular procesos de la rizósfera, la eficiencia de absorción de nutrientes y el metabolismo radical. Aunque el bioactivador evaluado en este estudio no corresponde a un inoculante microbiano, ambos enfoques coinciden en que el tratamiento de semilla puede influir en el desarrollo inicial del sistema radical y en la eficiencia fisiológica temprana.

Al integrar los resultados de germinación, emergencia, velocidad de respuesta y crecimiento temprano, se observa un patrón consistente: T1 fue el tratamiento de mejor desempeño, T2 presentó una respuesta favorable pero inferior, y T3 mantuvo los menores valores en la mayoría de variables evaluadas. Esta secuencia permite sostener que el bioactivador tuvo un efecto positivo sobre la calidad fisiológica de la semilla, pero que dicho efecto fue más marcado cuando se aplicó después de un proceso de hidratación previa. En concordancia con Li et al. (2022), los bioestimulantes pueden mejorar el desempeño vegetal, aunque su eficacia depende del método de aplicación, el tipo de producto, las condiciones ambientales y la especie evaluada. Por ello, en esta investigación, la combinación hidratación previa + bioactivador parece haber optimizado la expresión del vigor inicial en comparación con la aplicación directa sobre semilla seca.

No obstante, los resultados deben interpretarse con prudencia. El estudio fue desarrollado bajo condiciones controladas de laboratorio y sustrato,

por lo que la respuesta observada representa principalmente el comportamiento fisiológico inicial de las semillas y plántulas, mas no necesariamente el rendimiento final del cultivo en campo. Además, la magnitud del efecto podría variar según el genotipo de maíz, la calidad inicial de la semilla, la dosis del bioactivador, el tipo de suelo, la humedad disponible y las condiciones ambientales durante la siembra. Esta precaución coincide con Ocwa et al. (2024), quienes señalan que los bioestimulantes pueden mejorar la productividad del maíz, pero su efecto no siempre es uniforme y requiere validaciones adicionales en diferentes ambientes y sistemas de manejo.

Desde una perspectiva aplicada, los hallazgos sugieren que el tratamiento de semillas mediante hidratación previa y aplicación de bioactivador puede constituir una estrategia agronómica viable para mejorar el establecimiento inicial del maíz INIAP 543-QPM. Su uso podría ser especialmente útil en sistemas donde se busca una emergencia más uniforme, plántulas más vigorosas y una mejor respuesta inicial del cultivo. Sin embargo, su recomendación técnica debe considerar la relación costo-beneficio, la facilidad operativa del remojo previo y la validación de su efecto en etapas posteriores del desarrollo del cultivo. En consecuencia, la bioactivación de semillas, particularmente cuando se combina con hidratación previa, se perfila como una alternativa prometedora para fortalecer la fase inicial del cultivo de maíz, aunque su alcance debe limitarse, por ahora, al mejoramiento del desempeño temprano bajo condiciones controladas.

V. CONCLUSIONES

La aplicación del bioactivador de semillas influyó favorablemente en la germinación, emergencia, velocidad de respuesta y crecimiento temprano de plántulas de maíz INIAP 543-QPM. En conjunto, los resultados permiten responder al objetivo general del estudio, evidenciando que la bioactivación mejora el desempeño fisiológico inicial de las semillas frente al tratamiento control sin hidratación ni bioactivador. El tratamiento con semillas previamente hidratadas y tratadas con bioactivador fue la alternativa de

mejor desempeño experimental, al presentar los mayores valores en germinación, emergencia, índice de velocidad de germinación, índice de velocidad de emergencia, longitud de plántula, longitud radical y masa seca. Este patrón indica que la hidratación previa pudo potenciar la acción del bioactivador, favoreciendo una respuesta más rápida y vigorosa durante las primeras etapas de desarrollo.

El tratamiento con bioactivador aplicado directamente sobre semillas secas también mostró un efecto positivo respecto al control; sin embargo, su respuesta fue menor que la obtenida con la hidratación previa. Por tanto, los hallazgos sugieren que el bioactivador contribuye al vigor inicial del maíz, pero su eficiencia puede incrementarse cuando se combina con un proceso previo de hidratación de la semilla.

A pesar de la consistencia de los resultados en los dos ciclos de evaluación, el alcance del estudio debe interpretarse con prudencia, debido a que las pruebas se realizaron bajo condiciones controladas de laboratorio y sustrato. En consecuencia, los resultados permiten afirmar mejoras en la fase inicial de germinación y crecimiento de plántulas, pero no permiten asegurar efectos directos sobre el rendimiento final del cultivo en campo sin validaciones adicionales.

En términos aplicados, la hidratación previa combinada con bioactivador se perfila como una práctica promisoriosa para mejorar el establecimiento inicial del maíz INIAP 543-QPM, especialmente cuando se busca mayor uniformidad, rapidez de emergencia y vigor temprano. No obstante, su recomendación agronómica definitiva requiere evaluar su comportamiento en condiciones de campo, así como su viabilidad económica y operativa para los productores.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

Conceptualización: A.M.L. y G.C.G.; metodología: H.B.C. y G.C.G.; investigación: A.M.L. y H.B.C.; análisis de datos: G.C.G.; visualización: A.M.L.; redacción del borrador original: A.M.L. y H.B.C.; revisión y edición: G.C.G. y S.G.M. Todos los autores leyeron y aprobaron la versión final del manuscrito.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflictos de intereses relacionados con la publicación de este artículo.

FINANCIAMIENTO

La investigación no recibió financiamiento externo específico.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos generados durante el estudio están disponibles previa solicitud razonable al autor de correspondencia.

APROBACIÓN ÉTICA

No aplicable, debido a que el estudio no involucró seres humanos ni animales de experimentación.

VI. REFERENCIAS

- Capo, L., Sopegno, A., Reyneri, A., Ujvári, G., Agnolucci, M., & Blandino, M. (2023). Agronomic strategies to enhance the early vigor and yield of maize part II: The role of seed applied biostimulant, hybrid, and starter fertilization on crop performance. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1240313. doi:10.3389/fpls.2023.1240313
- Ellouzi, H., Ben Slimene Debez, I., Amraoui, S., Rabhi, M., Hanana, M., Alyami, N. M., Debez, A., Abdelly, C., & Zorrig, W. (2024). Effect of seed priming with auxin on ROS detoxification and carbohydrate metabolism and their relationship with germination and early seedling establishment in salt stressed maize. *BMC Plant Biology*, *24*, 704. doi:10.1186/s12870-024-05413-w
- Erenstein, O., Jaleta, M., Sonder, K., Mottaleb, K. A., & Prasanna, B. M. (2022). Global maize production, consumption and trade: Trends and R&D implications. *Food Security*, *14*, 1295–1319. doi:10.1007/s12571-022-01288-7
- FAO. (2024). *Agricultural production statistics 2010–2023*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Gámez, A., De la O-Olán, M., Avila, M., Virgen, J., Ruiz, N., Gámez, F., & Ascencio, A. (2017). Calidad fisiológica de semilla y desarrollo de plántulas de maíz a temperaturas bajas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *6*(8), 1769–1779. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i8.494>
- Ganugi, P., Fiorini, A., Ardeni, F., Caffi, T., Bonini, P., Taskin, E., Puglisi, E., Tabaglio, V., Trevisan, M., & Lucini, L. (2022). Nitrogen use efficiency, rhizosphere bacterial community, and root metabolome reprogramming due to maize seed treatment with microbial biostimulants. *Physiologia Plantarum*, *174*(2), e13679. <https://doi.org/10.1111/ppl.13679>
- Gohari, G., Spanos, A., Ioannou, A., Efstathiou, I., Panahirad, S., Kolbert, Z., & Fotopoulos, V. (2026). Seed priming approaches for climate-resilient agriculture. *Journal of Experimental Botany*, *77*(7), 2013–2026. doi:10.1093/jxb/eraf440
- INEC. (2025). *Boletín técnico de la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua ESPAC 2024*. Instituto Nacional de Estadística y Censos.
- International Seed Testing Association (ISTA). (2016). *International Rules for Seed Testing*. Published by *The International Seed Testing Association (ISTA)*, Zürichstr. 50, CH-8303 Bassersdorf, Suiza.
- Kasana, R. A., Iqbal, M., Ali, Q., Saeed, F., Rizwan, M., Perveen, R., & Yong, J. W. H. (2025). Synergistic effects of glutathione and zinc seed priming in alleviating salt stress on maize seed germination, metabolite levels, seedling vigor, and nutrient acquisition. *Plant Stress*, *15*, 100767. doi:10.1016/j.stress.2025.100767
- Li, J., Van Gerrewey, T., & Geelen, D. (2022). A meta-analysis of biostimulant yield effectiveness in field trials. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 836702. doi:10.3389/fpls.2022.836702
- Martínez, J., Virgen, J., Peña, M., & Romero, A. (2010). Speed of emergence of inbred

- maize lines. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1(3), 289–304. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v1n3/v1n3a2.pdf>
- Meng, A., Wen, D., & Zhang, C. (2022). Maize seed germination under low-temperature stress impacts seedling growth under normal temperature by modulating photosynthesis and antioxidant metabolism. *Frontiers in Plant Science*, 13, 843033. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.843033>
- Ocwa, A., Mohammed, S., Mousavi, S. M. N., Illés, Á., Bojtor, C., Ragán, P., Rátonyi, T., & Harsányi, E. (2024). Maize grain yield and quality improvement through biostimulant application: A systematic review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24, 1609–1649. doi:10.1007/s42729-024-01687-z
- Ujvári, G., Capo, L., Grassi, A., Cristani, C., Pagliarani, I., Turrini, A., Blandino, M., Giovannetti, M., & Agnolucci, M. (2023). Agronomic strategies to enhance the early vigor and yield of maize. Part I: The role of seed applied biostimulant, hybrid and starter fertilization on rhizosphere bacteria profile and diversity. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1240310. doi:10.3389/fpls.2023.1240310