

Bioestimulantes como estrategia de resiliencia climática: Evaluación de la respuesta agronómica de *Lactuca sativa* L. var. Crispa bajo esquemas de producción sostenible

Biostimulants as a strategy for climate resilience: Evaluation of the agronomic response of Lactuca sativa L. var. Crispa under sustainable production schemes

Summer, Villar Curo¹ ; Rene Antonio, Hinojosa Benavides¹  ; Giancarlo Joel, Pérez Mejía¹ ; Vito Raul, Chaupis Huaroc² ; Richard, Retamozo Ccorahua¹ ; Alfredo, Ozejo López¹ 

(1) Universidad Nacional Autónoma de Huanta, Ayacucho, Perú.

(2) Instituto de Educación Superior Tecnológico Público "Colcabamba" Huancavelica, Perú.

Resumen

La baja disponibilidad de alternativas de fertilización orgánica eficiente limita la productividad de las hortalizas y dificulta la transición hacia sistemas agrícolas sostenibles en zonas altas andinas. Para evaluar el efecto de cuatro bioestimulantes sobre el rendimiento y comportamiento agronómico de la lechuga variedad crispa, se desarrolló una investigación en condiciones de maceta en Luricocha, Huanta, a 2685 m s.n.m. Se implementó un diseño completamente al azar con 24 unidades experimentales distribuidas en seis repeticiones por tratamiento: T1 (biofermentado de cáscaras de frutas mixtas), T2 (fermentado de restos de lechuga y ortiga), T3 (té de follaje de leguminosas, alfalfa) y T4 (extracto de cáscara de plátano y papaya). A lo largo de 59 días posteriores al trasplante, se evaluaron variables de rendimiento, como el peso fresco, peso seco y porcentaje de materia seca, junto con parámetros de comportamiento agronómico, tales como la altura de planta, el número de hojas y el área foliar. Los datos se procesaron mediante el análisis de varianza y la prueba de medias de Tukey con un nivel de significancia de $p < 0,05$. Los resultados demostraron diferencias significativas entre los tratamientos, destacando que T3 alcanzó los mayores valores en peso fresco (816,42 g), peso seco (34,20 g), materia seca (4,06%), área foliar (523,89 cm²) y número de hojas (41,50), mientras que T3 y T4 impulsaron la mayor altura vertical. En contraste, T2 registró los desempeños más reducidos del ensayo. Se concluye que los bioestimulantes agrícolas a base de residuos orgánicos, en particular el té de follaje de leguminosas, constituyen alternativas altamente efectivas y sostenibles para potenciar el rendimiento y desarrollo agronómico de la lechuga.

Palabras clave: bioestimulantes; *Lactuca sativa*; rendimiento de cultivos; residuos orgánicos.

Abstract

The low availability of efficient organic fertilization alternatives limits vegetable productivity and hinders the transition toward sustainable agricultural systems in high Andean zones. To evaluate the effect of four biostimulants on the yield and agronomic performance of the crisphead lettuce variety, research was conducted under pot conditions in Luricocha, Huanta, at 2,685 meters above sea level. A completely randomized design with 24 experimental units distributed in six replications per treatment was implemented: T1 (mixed fruit peel bio-ferment), T2 (lettuce and nettle residue ferment), T3 (legume foliage tea, alfalfa), and T4 (banana and papaya peel extract). Over 59 days post-transplant, yield variables such as fresh weight, dry weight, and dry matter percentage were evaluated, along with agronomic performance parameters such as plant height, number of leaves, and leaf area. Data were processed using analysis of variance and Tukey's test for means comparison at a significance level of $p < 0.05$. The results showed significant differences among treatments, highlighting that T3 achieved the highest values in fresh weight (816.42 g), dry weight (34.20 g), dry matter (4.06%), leaf area (523.89 cm²), and number of leaves (41.50), while T3 and T4 promoted the greatest vertical height. In contrast, T2 recorded the lowest performance in the trial. It is concluded that organic waste-based agricultural biostimulants, particularly legume foliage tea, constitute highly effective and sustainable alternatives to enhance the yield and agronomic development of lettuce.

Keywords: biostimulants; crop yield; *Lactuca sativa*; organic waste

Recibido/Received	14-04-2026	Aprobado/Approved	23-07-2026	Publicado/Published	24-07-2026
-------------------	------------	-------------------	------------	---------------------	------------

Introducción

La horticultura representa un pilar estratégico en los sistemas agroalimentarios andinos, contribuyendo de manera significativa a la seguridad alimentaria y la economía rural en regiones como Ayacucho, Perú (Schreinemachers et al., 2018). La producción de hortalizas constituye un componente esencial de los sistemas agroalimentarios sostenibles, debido a su contribución directa a la seguridad alimentaria, la nutrición humana y el desarrollo socioeconómico local; en este contexto, la lechuga (*Lactuca sativa* L.) se posiciona comercialmente como una de las hortalizas de mayor consumo global, destacando por su alto valor nutricional, su rápido ciclo productivo y su elevada rentabilidad para los pequeños productores (Eaton et al., 2023; Kumar et al., 2024; Maynard et al., 2023). Sin embargo, la intensificación de su cultivo enfrenta severas limitaciones asociadas al uso recurrente y excesivo de fertilizantes sintéticos, los cuales incrementan los costes operativos y desencadenan impactos ecológicos adversos sobre la fertilidad edáfica y la estabilidad a largo plazo de los agroecosistemas (Bulgari et al., 2019; Atero-Calvo et al., 2025).

Frente a los escenarios adversos condicionados por la variabilidad climática y la progresiva degradación de los recursos hídricos y edáficos, los bioestimulantes se configuran como una alternativa tecnológica sostenible al potenciar de forma sinérgica la eficiencia en la asimilación de nutrientes y la tolerancia a estrés de naturaleza biótica y abiótica (Di Sario et al., 2025; Khoulati et al., 2025; López et al., 2026). En este sentido, dichos insumos bioactivos, constituidos por extractos orgánicos, aminoácidos y metabolitos microbianos, han adquirido una notable relevancia en la investigación agronómica contemporánea, fundamentada en su capacidad demostrada para incrementar el rendimiento y la calidad comercial de las cosechas sin comprometer la integridad de los agroecosistemas (Rouphael y Colla, 2020; Roche et al., 2024). En estricta concordancia con las premisas planteadas por Parađiković et al. (2019), la integración sistemática de estas formulaciones en el itinerario técnico del cultivo de la lechuga incide de manera decisiva en la optimización de sus atributos morfofisiológicos, fisicoquímicos y nutricionales.

Paralelamente, tales bioestimulantes formulados a partir de extractos orgánicos complejos, metabolitos microbianos o subproductos agroindustriales, actúan estimulando rutas fisiológicas fundamentales, tales como la asimilación eficiente de nutrientes minerales, la capacidad fotosintética y el sistema antioxidante vegetal (Raghvendra y Sankalp, 2024; Carillo et al., 2025). Por su partela aplicación exógena incrementa de forma consistente la productividad hortícola (Benito et al., 2024; Lemos et al., 2025). Particularmente en los agroecosistemas de pequeña escala, el aprovechamiento de bioestimulantes derivados de residuos orgánicos locales configura una estrategia viable y cimentada en la economía circular, orientada a disminuir la dependencia de insumos externos (Ali et al., 2021; Torres et al., 2025). No obstante, persiste una marcada escasez de evidencia científica rigurosa respecto a su desempeño específico bajo condiciones agroecológicas particulares, lo que restringe su transferencia tecnológica y adopción masiva por parte de los productores locales.

Particularmente en el valle de Luricocha, situado en la provincia de Huanta, reconocido históricamente por su profunda vocación hortícola, los agricultores afrontan desafíos socioambientales apremiantes vinculados directamente a la degradación progresiva de las propiedades edáficas y a la acentuada dependencia de fertilizantes y plaguicidas sintéticos. Esta dinámica de manejo convencional, sostenida durante décadas, menoscaba de manera sistemática la fertilidad natural del suelo, reduce la biodiversidad microbiana de la rizosfera y compromete la estabilidad productiva de los sistemas agrícolas locales frente a las fluctuaciones climáticas contemporáneas (Esteves et al., 2023; Hinojosa et al., 2019). Ante este escenario complejo, en el marco indispensable del rescate, conservación y valorización del potencial endógeno natural y cultural de la región, resulta imperativo investigar, adaptar y validar alternativas tecnológicas sostenibles que permitan dinamizar la productividad hortícola sin acelerar el deterioro de los recursos naturales (Yzarra et al., 2021; Martínez et al., 2024; Sánchez et al., 2026). Por consiguiente, con el propósito fundamental de generar evidencia científica aplicable que

contribuya a la transición agroecológica de la zona, así evaluar el efecto diferencial formulaciones de bioestimulantes sobre la respuesta agronómica, el rendimiento y los parámetros de calidad de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) variedad “crispa”, cultivada bajo condiciones controladas de maceta en el distrito de Luricocha, Huanta.

Materiales y métodos

Estudio de tipo aplicado, nivel explicativo y enfoque cuantitativo, se desarrolló bajo condiciones controladas (macetas) en el distrito de Luricocha, perteneciente a la provincia de Huanta, región Ayacucho, Perú (ubicado geográficamente a 12°54'21.78" S, 74°16'17.21" W, a una altitud de 2 685 m s.n.m.). El medio de cultivo estuvo constituido por una mezcla homogénea de sustratos compuesta por suelo, compost y piedrilla en una proporción volumétrica de 70:20:10, respectivamente, garantizando las condiciones físicas y nutricionales óptimas para el establecimiento del cultivo.

Diseño experimental y tratamientos

Se empleó un **Diseño Completamente al Azar (DCA)**, evaluando un total de 24 unidades experimentales distribuidas de manera equitativa entre los tratamientos de estudio. El experimento consideró cuatro tratamientos correspondientes a distintos bioestimulantes de origen orgánico, los cuales fueron elaborados a partir de materiales vegetales mediante procesos controlados de fermentación o extracción acuosa, tal como se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Preparación de los bioestimulantes e ingredientes principales

Tratamiento	Bioestimulante	Ingredientes principales
T1	Biofermentado de cáscaras de frutas mixtas	500 g de cáscaras de plátano, manzana, piña y naranja; 2 L de agua; 150 g de panela
T2	Fermentado de restos de lechuga y ortiga	1 kg de restos de lechuga; 1 kg de ortiga fresca; 10 L de agua; 200 g de melaza
T3	Té de follaje de leguminosas	1 kg de follaje fresco de alfalfa; 10 L de agua
T4	Extracto de cáscara de plátano y papaya	1 kg de cáscaras de plátano; 500 g de cáscaras de papaya; 2 L de agua; 100 g de panela o melaza

Análisis estadístico

Los datos recabados fueron sometidos a un Análisis de Varianza (ANOVA) para determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados. En los casos donde se hallaron efectos significativos ($p < 0,05$), se procedió a realizar la prueba de comparación de medias de Tukey al 95% de confianza, utilizando para todo el procesamiento analítico el software estadístico correspondiente.

Resultados

Rendimiento

A los 59,00 días después del trasplante, los resultados del análisis de rendimiento evaluados mediante la prueba de medias de Tukey (Figura 1) evidencian diferencias notables en la acumulación de biomasa fresca entre los tratamientos evaluados. El tratamiento T3 alcanzó el valor más alto con un promedio aproximado de 816,00 g, seguido por el tratamiento T1 con aproximadamente 731,00 g y el tratamiento T4 con un rendimiento intermedio de cerca de 667,00 g. En contraste, el tratamiento T2 registró el valor más bajo de peso fresco con un aproximado de 636,00 g.

En cuanto al comportamiento del peso seco a los 59,00 días posteriores al establecimiento del cultivo (Figura 2), la prueba de medias de Tukey demostró una tendencia consistente con los registros de biomasa fresca. El tratamiento T3 se posicionó nuevamente como el más efectivo, registrando el valor más elevado con un estimado de 34,00 g. Este fue seguido por el tratamiento T1 con cerca de 28,00 g y

el tratamiento T4 con un valor de aproximadamente 26,00 g, mientras que el tratamiento T2 obtuvo el registro mínimo del ensayo con cerca de 19,00 g.

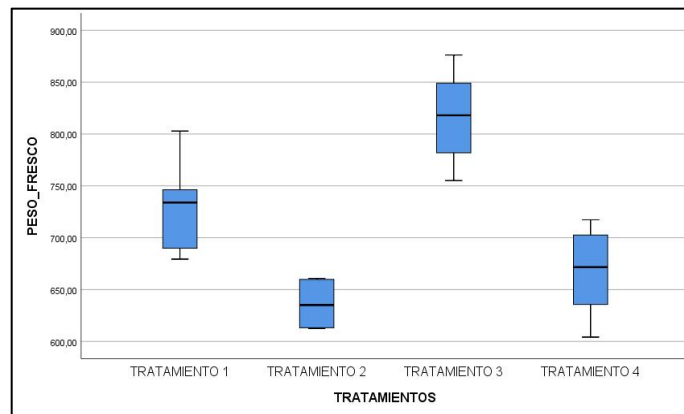


Figura 1. Diagrama de cajas y bigotes para la prueba de medias de Tukey



Figura 2. Diagrama de cajas y bigotes para la prueba de medias de Tukey

La determinación cuantitativa del porcentaje de materia seca a los 59,00 días después del trasplante (Tabla 2) confirma la superioridad de los tratamientos en la eficiencia fisiológica del cultivo. El tratamiento T1 registró un peso fresco de 793,98 g, un peso seco de 28,35 g y un porcentaje de materia seca del 3,57%. Por su parte, el tratamiento T2 presentó 598,80 g de peso fresco, 18,64 g de peso seco y un rendimiento del 3,11% en materia seca. El tratamiento T3 destacó con los valores más altos de la investigación, alcanzando 842,18 g de peso fresco, 34,20 g de peso seco y un máximo de 4,06% de materia seca. Finalmente, el tratamiento T4 reportó 710,83 g de peso fresco, 26,38 g de peso seco y un 3,71% de materia seca. Estos datos evidencian que el tratamiento T3 promovió la mayor eficiencia en la acumulación de fotoasimilados en relación con su biomasa total.

Tabla 2. Determinación del porcentaje de materia seca en lechuga

Tratamientos	Peso fresco (g)	Peso seco (g)	Materia seca (%)
T1	793,98	28,35	3,57
T2	598,80	18,64	3,11
T3	842,18	34,20	4,06
T4	710,83	26,38	3,71

Comportamiento agronómico

Los resultados correspondientes a la variable de altura de planta, evaluados mediante la prueba de medias de Tukey (Figura 3), muestran diferencias sustanciales en el desarrollo vertical de los tratamientos a los 59,00 días posteriores al trasplante. El tratamiento T4 registró la mayor altura de planta con un valor aproximado de 22,71 cm, seguido de cerca por el tratamiento T3 con cerca de 21,88 cm y el tratamiento T1 con un promedio de 19,80 cm. Por el contrario, el tratamiento T2 presentó la menor altura de todo el ensayo con un valor estimado en 18,21 cm.

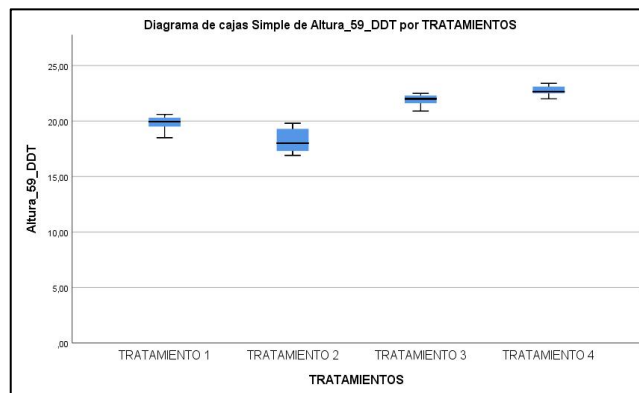


Figura 3. Diagrama de cajas y bigotes para la prueba de medias de Tukey

En relación con la emisión y desarrollo del número de hojas (Figura 4), la prueba de medias de Tukey evidenció variaciones significativas en la capacidad foliar del cultivo bajo los diferentes tratamientos evaluados. El tratamiento T3 se posicionó con el mayor valor, alcanzando un promedio aproximado de 41,50 hojas por planta. Este fue seguido por el tratamiento T1 con cerca de 36,33 hojas y el tratamiento T4 con un promedio de 29,83 hojas, mientras que el tratamiento T2 registró el menor valor con un estimado de 27,50 hojas.

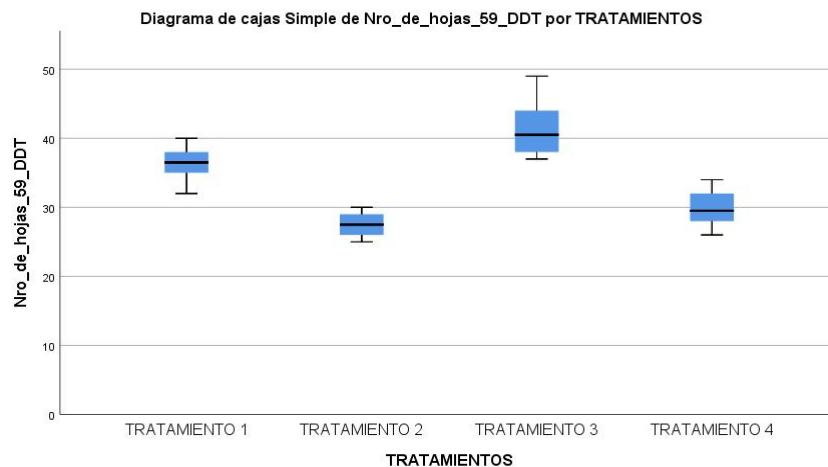


Figura 4. Diagrama de cajas y bigotes para la prueba de medias de Tukey

Respecto a la superficie fotosintética analizada a través del área foliar (Figura 5), los datos obtenidos mediante la prueba de medias de Tukey indican un comportamiento diferenciado en la expansión de las hojas. El tratamiento T3 registró la mayor área foliar con un valor aproximado de 523,89 cm², seguido por el tratamiento T4 con cerca de 494,58 cm² y el tratamiento T2 con un valor de

396,02 cm². En contraste, el tratamiento T1 registró el menor valor de área foliar de la investigación, ubicándose en aproximadamente 381,64 cm².

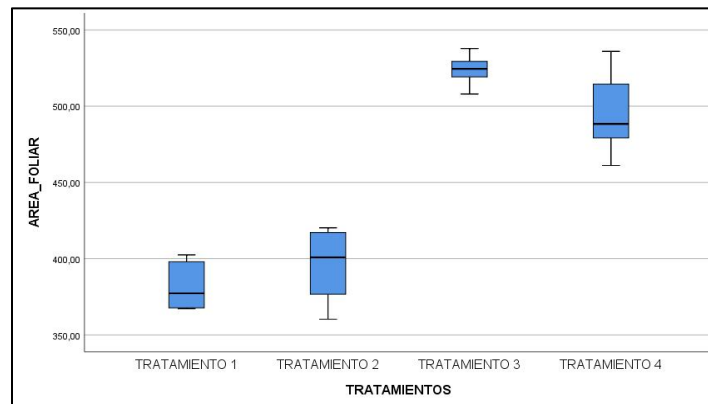


Figura 5. Diagrama de cajas y bigotes para la prueba de medias de Tukey

Discusión

La intensificación sostenible de la agricultura contemporánea exige la adopción de alternativas ecológicas que incrementen la productividad de los cultivos hortícolas sin comprometer la sanidad ambiental, consolidando a los bioestimulantes orgánicos como herramientas clave en la transición agroecológica. Desde una perspectiva mecanística, el mayor peso fresco y área foliar observados en el tratamiento T3 (basado en extractos de leguminosas) coincide con lo reportado por Roupheal y Colla (2020), quienes explican que el uso de bioestimulantes ejerce una acción sinérgica de compuestos bioactivos tales como aminoácidos, péptidos señalizadores, fitohormonas y metabolitos secundarios, como una manifestación fenotípica de una mayor eficiencia fisiológica y mayor acumulación de biomasa inducida por dichos compuestos. Los resultados obtenidos evidencian que la aplicación de bioestimulantes orgánicos influye significativamente en el rendimiento y comportamiento agronómico de la lechuga, lo cual es consistente con la tendencia reportada por Zulfiqar et al. (2024), quienes concluyen que la implementación y el uso de bioestimulantes es actualmente una realidad con beneficios económicos para los productores agrícolas, y el desarrollo de nuevos bioestimulantes es prometedor y sin duda ayudará a aumentar de manera sostenible la producción de más cultivos y hortalizas. Adicionalmente, estos procesos de optimización metabólica y mejora en la eficiencia de recursos guardan concordancia con las investigaciones de Ali et al. (2021) y Carillo et al. (2025), quienes destacan la versatilidad de estos compuestos en la agricultura moderna.

Por otra parte, al analizar los componentes de biomasa, T3 registró el peso seco medio más elevado (≈ 34 g), mientras que T2 registró el valor más bajo (≈ 19 g), un comportamiento similar a lo reportado por Benito et al. (2024), quienes señalan la variabilidad en la respuesta de los cultivos a diferentes formulaciones de bioestimulantes. Es importante reconocer que la efectividad de los bioestimulantes no es homogénea y depende de múltiples factores, incluyendo su composición, dosis, método de aplicación y condiciones ambientales. En particular, el mejor desempeño del tratamiento T3 (té de follaje de leguminosas) sugiere un efecto positivo asociado a la presencia de compuestos bioactivos como aminoácidos, fitohormonas y compuestos fenólicos, los cuales desempeñan un rol clave en la regulación del crecimiento vegetal, coincidiendo con Ruzzi et al. (2024), quienes argumentaron que el uso de bioestimulantes vegetales, independientemente de su origen, contribuirá cada vez más a una transición obligatoria hacia sistemas de producción más sostenibles desde el punto de vista económico y ecológico. En la misma línea, investigaciones complementarias de Bulgari et al. (2019) y Di Sario et al.

(2025) respaldan que la modulación fisiológica inducida por extractos orgánicos optimiza la asignación de biomasa seca en especies hortícolas bajo diversas condiciones.

En cuanto a la determinación de la materia seca, se observan diferencias notorias entre tratamientos, donde T3 supera consistentemente a los demás, sugiriendo un efecto positivo del bioestimulante asociado con acumulación de materia seca y N-orgánico. Estos resultados se alinean con Shahrajabian et al., citados en la literatura general sobre la temática, y con Melo y Contreras (2024), quienes manifiestan que hay diversas estrategias para mitigar el estrés hídrico en hortalizas, que incluyen prácticas agrícolas como la aplicación exógena de fitohormonas, osmoprotectores y nutrientes específicos; estas sustancias, según la dosis evaluada y la respuesta de la planta, se han considerado bioestimulantes de compuestos que estimulan el crecimiento y desarrollo vegetal. Este marco permite trascender la visión tradicional de la fertilización, posicionando a los bioestimulantes como catalizadores de procesos biológicos complejos, respaldados por los aportes teóricos de Fassih y El-Ramady (2026) y Khoulati et al. (2025).

Al profundizar en el comportamiento agronómico, se observó un mayor desarrollo vegetativo en T3, concordando con Rouphael y Colla (2020), quienes sostienen que los bioestimulantes actúan modulando rutas metabólicas que incrementan la biomasa y el rendimiento de cultivos hortícolas. De manera complementaria, du Jardin (2020) señala que los bioestimulantes promueven la expresión génica relacionada con el crecimiento, concordando con Ciriello et al. (2024) y Calvo et al. (2022), quienes afirman que el uso de bioestimulantes orgánicos mejora el rendimiento por su potencial de optimizar la eficiencia de los recursos; sin embargo, también se reconoce que su uso debe integrarse dentro de un manejo agronómico integral, ya que por sí solos no constituyen una solución absoluta para garantizar la productividad agrícola. Esto es particularmente relevante en contextos donde los agricultores enfrentan limitaciones económicas y ambientales, argumentos que se complementan con los estudios de Martínez et al. (2024) y Parađiković et al. (2019) sobre la plasticidad fenotípica inducida.

En lo referente al número de hojas, los resultados obtenidos en el tratamiento T2, que presentó los valores más bajos, sugieren que no todos los bioestimulantes generan efectos positivos uniformes, lo cual coincide con lo reportado por Yakhin et al. (2021), quienes indican que la eficacia de estos productos depende de su composición química, concentración y método de aplicación. En este contexto, Benito et al. (2024) aseveran que los bioestimulantes, como extractos vegetales, son ricos en aminoácidos, fitohormonas y microorganismos que mejoran la fotosíntesis, expansión foliar y acumulación de biomasa en lechuga. De igual manera, se evidencia que la aplicación de bioestimulantes orgánicos derivados de residuos agrícolas genera efectos significativos, particularmente en variables relacionadas con la acumulación de biomasa y expansión foliar; hallazgo que se inscribe dentro de lo observado por Chabili et al. (2024), quienes aseveran que el uso de estos bioestimulantes en la agricultura puede contribuir indirectamente a mejorar los servicios ecosistémicos agrícolas al afectar los componentes del suelo y los microorganismos. Esto resalta la importancia de validar técnicamente los bioestimulantes bajo condiciones locales antes de su adopción generalizada, tal como lo enfatizan Lemos et al. (2025) y Roche et al. (2024).

Finalmente, en cuanto al área foliar, el mejor desempeño del tratamiento T3 puede explicarse por el aporte de nitrógeno orgánico y compuestos promotores del crecimiento presentes en las leguminosas, como aminoácidos y fitohormonas, que favorecen la síntesis de clorofila y la expansión celular. Este hallazgo es consistente con Simões et al. (2024), quienes reportaron que biopreparados a base de ortiga y extractos fermentados incrementaron el crecimiento aéreo del cultivo, coincidiendo con Yousfi et al. (2021), quienes indicaron que los bioestimulantes promueven naturalmente el crecimiento de las plantas, mejoran la eficiencia en el uso de nutrientes y actúan como moduladores del metabolismo vegetal promoviendo la activación de rutas relacionadas con la síntesis de clorofila, la expansión celular, la eficiencia fotosintética y las respuestas transcripcionales que regulan la expresión génica asociada al transporte de nutrientes y al metabolismo del carbono, lo que se traduce en mayor

acumulación de biomasa. En este contexto, Raghvendra y Sankalp (2024) destacan el efecto de bioestimulantes en la activación metabólica y la absorción de nutrientes, evidenciándose que la aplicación de bioestimulantes orgánicos derivados de residuos agrícolas genera efectos significativos, particularmente en variables relacionadas con la acumulación de biomasa y expansión foliar, lo cual se alinea sólidamente con las observaciones de Lau et al. (2025), López et al. (2026) y Wu et al. (2026).

Consideraciones finales

A la luz de los resultados obtenidos se concluye que los bioestimulantes agrícolas actúan como potenciadores fisiológicos, más que como simples fuentes de nutrientes, promoviendo la acumulación de biomasa, la expansión foliar y el vigor general de la planta, mejorando el rendimiento y comportamiento agronómico de la *Lactuca sativa*, en condiciones de maceta; es así que, los mejores resultados para peso fresco, peso seco y materia seca, fueron obtenidos mediante la aplicación del té de follaje de leguminosas; mientras que, los mejores resultados para área foliar y número de hojas, fueron obtenidos mediante la aplicación del té de follaje de leguminosas; mientras que, para altura de planta, el extracto de cáscara de plátano y papaya presentó los mejores resultados.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de Huanta que autorizó la ejecución de la presente investigación, y mediante Resolución de Vicepresidencia Académica N° 064-2026-CO-UNAH aprobó la sustentación de la tesis titulada: “Comparación de cuatro bioestimulantes agrícolas en el rendimiento y comportamiento agronómico de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) en Luricocha, Huanta”.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que “No existe ningún tipo de interés relacionado con la materia del trabajo.

Referencias

- Ali, O., Ramsubhag, A., & Jayaraman, J. (2021). Biostimulant properties of seaweed extracts in plants: Implications towards sustainable crop production. *Plants*, 10(3), 531. <https://doi.org/10.3390/plants10030531>
- Atero-Calvo, S., López-Gómez, E., Lloret, P., & García-Martínez, S. (2025). Physiological efficacy of the amino acid-based biostimulants Pepton 85/16, Pepton origin, and Nutriterra in lettuce grown under optimal and reduced synthetic nitrogen fertilization. *Frontiers in Plant Science*, 16, Article 1645768. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1645768>
- Benito, P., Celdrán, M., Bellón, J., Arbona, V., González, M., Porcel, R., Yenush, L., & Mulet, J. (2024). The combination of a microbial and a non-microbial biostimulant increases yield in lettuce (*Lactuca sativa*) under salt stress conditions by up-regulating cytokinin biosynthesis. *Journal of Integrative Plant Biology*, 66(11), 2140–2157. <https://doi.org/10.1111/jipb.13755>
- Bulgari, R., Franzoni, G., & Ferrante, A. (2019). Biostimulants application in horticultural crops under abiotic stress. *Agronomy*, 9(6), 306. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060306>
- Carillo, P., Ciriello, M., & Rouphael, Y. (2025). Improving crop yield and produce quality using biostimulants. En *Biostimulants for Improving Reproductive Growth and Crop Yield* (pp. 239–257). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13207-0.00010-X>
- Chabili, A., Minaoui, F., Hakkoum, Z., Douma, M., Meddich, A., & Loudiki, M. (2024). A comprehensive review of microalgae and cyanobacteria-based biostimulants for agriculture uses. *Plants*, 13(2), 159. <https://doi.org/10.3390/plants13020159>

- Villar Curo, S., Hinojosa Benavides, R. A., Pérez Mejía, G. J., Chaupis Huaroc, V. R., Retamozo Ccorahua, R., & Ozejo López, A. (2026). Bioestimulantes como estrategia de resiliencia climática: Evaluación de la respuesta agronómica de Lactuca sativa L. var. Crispa bajo esquemas de producción sostenible. *e-Revista Multidisciplinaria Del Saber*, 4, e-RMS07072026. <https://doi.org/10.61286/e-rms.v4i.464>
- Ciriello, M., Fusco, G., Woodrow, P., Carillo, P., & Roupshael, Y. (2024). Unravelling the nexus of plant response to non-microbial biostimulants under stress conditions. *Plant Stress*, 11, 100421. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100421>
- Di Sario, L., Boeri, P., Matus, J. T., & Pizzio, G. A. (2025). Plant biostimulants to enhance abiotic stress resilience in crops. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(3), 1129. <https://doi.org/10.3390/ijms26031129>
- Eaton, M., Shelford, T., Cole, M., & Mattson, N. (2023). Modeling resource consumption and carbon emissions associated with lettuce production in plant factories. *Journal of Cleaner Production*, 384, Article 135569. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135569>
- Fassih, B., & El-Ramady, H. (2026). Biostimulants for sustainable and resilient agriculture: Mechanisms, challenges, and future perspectives. *Sustainability*, 18(14), 7342. <https://doi.org/10.3390/su18147342>
- Gardiner-Piggott, A., & Taylor, M. (2025). The effects of high temperature stress and its mitigation through the application of biostimulants in controlled environment agriculture. *Agronomy*, 15(12), 2742. <https://doi.org/10.3390/agronomy15122742>
- Khoulati, A., Ouahhoud, S., Taibi, M., & Meddich, A. (2025). Harnessing biostimulants for sustainable agriculture: Innovations, challenges, and future prospects. *Discovery Agriculture*, 3, Article 56. <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00177-9>
- Lau, S. E., Teoh, Y. P., & Abdullah, S. (2025). Enhancing plant resilience to abiotic stress: The power of biostimulants. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 94(1), 1–25. <https://doi.org/10.32604/phyton.2025.059930>
- Lemos, O., Braga, J., De Souza, V., Câmara, A., Alves, A., Oliveira, L., & Dousseau, S. (2025). Potential of the use of biostimulants in lettuce production. *Plants*, 14(15), 2416. <https://doi.org/10.3390/plants14152416>
- López, L., Scalschi, L., Simeón, R., San Bautista, A., & González, A. (2026). Harnessing the power of biostimulants: A comprehensive review of their role in enhancing agricultural productivity and sustainability. *Applied Sciences*, 16(4), Article 1924. <https://doi.org/10.3390/app16041924>
- Martínez, S., Martí, J., Pedreño, M., Almagro, L., & Sabater, A. (2024). Higher plant-derived biostimulants: Mechanisms of action and their role in mitigating plant abiotic stress. *Antioxidants*, 13(3), 318. <https://doi.org/10.3390/antiox13030318>
- Maynard, R., Burkhardt, J., & Quinn, J. (2023). Sustainability of lettuce production: A comparison of local and centralized food production. *Journal of Cleaner Production*, 428, 139224. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139224>
- Melo, D., & Contreras, L. (2024). Elicitors and biostimulants to mitigate water stress in vegetables. *Horticulturae*, 10(8), 837. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10080837>
- Parađiković, N., Teklić, T., Zeljković, S., Lisjak, M., & Špoljarević, M. (2019). Biostimulants research in some horticultural plant species—A review. *Food Energy Security*, 8(2), e00162. <https://doi.org/10.1002/fes3.162>
- Raghvendra, D., & Sankalp, M. (2024). Biostimulants: An eco-friendly regulator of plant stress tolerance and sustainable solution to future agriculture. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 91(3), 455–470. <https://doi.org/10.1007/s43538-024-00328-4>
- Roche, D., Rickson, J., & Pawlett, M. (2024). Moving towards a mechanistic understanding of biostimulant impacts on soil properties and processes: A semi-systematic review. *Frontiers in Agronomy*, 6, 1271672. <https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1271672>

- Villar Curo, S., Hinojosa Benavides, R. A., Pérez Mejía, G. J., Chaupis Huaroc, V. R., Retamozo Corahua, R., & Ozejo López, A. (2026). Bioestimulantes como estrategia de resiliencia climática: Evaluación de la respuesta agronómica de *Lactuca sativa* L. var. Crispa bajo esquemas de producción sostenible. *e-Revista Multidisciplinaria Del Saber*, 4, e-RMS07072026. <https://doi.org/10.61286/e-rms.v4i.464>
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Editorial: Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 11, Article 40. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040>
- Ruzzi, M., Colla, G., & Rouphael, Y. (2024). Editorial: Biostimulants in agriculture II: Towards a sustainable future. *Frontiers in Plant Science*, 15, Article 1427283. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1427283>
- Satshi, S. (2025). *Morphophysiological and biochemical recovery response of lettuce (Lactuca sativa L. var. Crispa) to multistress and the application of a phytohormone-based biostimulant* [Tesis de maestría, Central University of Technology]. Repositorio FAO AGRIS. <https://agris.fao.org/search/en/providers/124732/records/6995a967e6c33ba92ad65a4e>
- Simões, J., Marmota, C., Moreira, L., Costa, J., Correia, H., Pinto, A., Wessel, D., Delgado, F., Carneiro, J., Horta, C., Bahcevandziev, K., Vidal, M., Filipe, O., & Amaro, C. (2024). Biostimulants in organic vegetable nurseries: Study case in lettuce. *AIMS Agriculture and Food*, 9(3), 842–855. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2024045>
- Torres, J., Rivero, M., Reyes, J., Marín, C., Gutiérrez, E., & Rueda, E. (2025). Bioestimulantes orgánicos como alternativa ecológica sobre el desarrollo y rendimiento del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.). *Bioagro*, 37(2), 189–198. <https://doi.org/10.51372/bioagro372.5>
- Wu, J., Zhang, Y., & Li, H. (2026). Horticultural strategies for enhancing yield and quality in hydroponic microgreens: A comprehensive review. *Horticulturae*, 12(5), 595. <https://doi.org/10.3390/horticulturae1250595>
- Yousfi, S., Marín, J., Parra, L., Lloret, J., & Mauri, P. (2021). Efecto de un bioestimulante rizogénico sobre la fertilidad del suelo y el crecimiento de las raíces del césped. *Agronomy*, 11(3), Article 573. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030573>
- Zulfiqar, F., Moosa, A., Ali, H., Bermejo, N., & Munné, S. (2024). Biostimulants: A sufficiently effective tool for sustainable agriculture in the era of climate change? *Plant Physiology and Biochemistry*, 211, Article 108699. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108699>
- Zhang, H., Ghahramani, A., Ali, A., & Erbacher, A. (2023). Cover cropping impacts on soil water and carbon in dryland cropping system. *PLoS ONE*, 18(6), Article e0286748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286748>