

Valorization of fish waste and brown algae into a biostimulant to promote sustainable agriculture in Lima, Perú.

Alvaro Joaquin Solis Coronado¹; Merli Nayeli Yaranga Romani²; Juan Gabriel Juscamaita Morales³ and Samuel Astete⁴

^{1,2,4} Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u202111737@upc.edu.pe, u20211d840@upc.edu.pe, pcigsast@upc.edu.pe;

³ Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú, jjm@lamolina.edu.pe.

Abstract: *In the fishing industry, approximately 35% of captured products are lost or wasted. These by-products not only represent an economic loss due to the high value of essential mineral compounds but also contribute to environmental pollution. In response to this issue, an alternative has emerged: the production of agricultural biostimulants through enzymatic hydrolysis. The aim of this study was to evaluate the germination index of Lettuce (*Lactuca sativa*) var. Tropicana seeds treated with a biostimulant derived from fish waste combined with algae, and to compare it with an algae-based biostimulant through a phytotoxicity assay. The results showed a germination index greater than 80% at dilutions from 0.001% to 0.00001%, indicating the absence of phytotoxic substances in the biostimulant. This proposal demonstrates its potential as a sustainable alternative to agriculture.*

Keywords: *biostimulant, germination index, lettuce, fish waste, algae.*

Valorización de residuos de pescado y algas pardas en bioestimulante para impulsar una agricultura sostenible en Lima, Perú.

Alvaro Joaquin Solis Coronado¹; Merli Nayeli Yaranga Romani²; Juan Gabriel Juscamaita Morales³ and Samuel Astete⁴

^{1,2,4} Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u202111737@upc.edu.pe, u20211d840@upc.edu.pe, pcigsast@upc.edu.pe;

³ Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú, jjm@lamolina.edu.pe.

Resumen: En la actividad pesquera se pierde o desperdicia cerca del 35% de los productos capturados. Estos subproductos no solo representan una pérdida económica debido al alto valor de los compuestos minerales esenciales, sino también provocan contaminación ambiental. Ante ello, surge una alternativa: la elaboración de un bioestimulante agrícola mediante hidrólisis enzimática. El propósito del estudio es evaluar el índice de germinación de semillas de Lechuga (*Lactuca sativa*) variedad Tropicana tratadas con un bioestimulante a base de residuos de pescado combinados con algas, en comparación con un bioestimulante elaborado con algas, a través de un ensayo de fitotoxicidad. Los resultados demostraron un índice de germinación mayor al 80% en diluciones de 0.001% al 0.00001%, este indicador representa la ausencia de sustancias fitotóxicas en el bioestimulante. Esta propuesta demuestra ser una alternativa sostenible para la agricultura.

Palabras Clave: bioestimulante, índice de germinación, lechuga, residuos de pescado, alga.

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial la industrialización y la urbanización ha ocasionado la disminución de tierras agrícolas provocando que los agricultores utilicen fertilizantes químicos para obtener mayor rendimiento en los cultivos durante los últimos 150 años [1]. Esta situación ha generado una dependencia permanente de estos productos [2]. Es así como en el 2022 el uso de fertilizantes inorgánicos alcanzó los 185 millones de toneladas de nutrientes a nivel mundial [3]. Este modelo productivo disminuye la fertilidad del suelo [3] [4].

Si bien la actividad agrícola es necesaria, se puede minimizar el impacto ambiental mediante la adopción de prácticas de producción más sostenibles [5]. Así contribuiría al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible 12 (Garantizar el consumo y la producción sostenibles) reduciendo la huella de carbono en la cadena de suministro de los insumos [5].

El sector pesquero produce alrededor de 93 millones de toneladas de pescado al año, pero al mismo tiempo genera aproximadamente 65 millones de tn de residuos a nivel mundial [6]. A ello se suma, que cerca del 35% de los productos pesqueros capturados se pierde o desperdicia en alguna etapa de la cadena de valor [7]. Desde esta premisa, se estima que solo entre el 8.6% y el 36.9% del pescado corresponde al filete, mientras que entre el 91.4% y el 63.1% restante está compuesto por vísceras, escamas, colas y otros subproductos, en la mayoría

de los casos, son descartados al momento de ser comercializados [8].

En esta línea, los residuos pesqueros se presentan como una alternativa viable para la producción de bioestimulantes agrícolas mediante procesos como la fermentación, hidrólisis y biotransformación microbiana [9]; [10]. Los bioestimulantes son mezclas, microorganismos o sustancias, cuya finalidad es potenciar los cultivos para incrementar la capacidad de absorber y aprovechar los nutrientes disponibles en la rizosfera o en el suelo [11].

Estudios recientes han demostrado que las algas pardas, especialmente especies como la *Macrocystispyrifer*, contienen fitohormonas naturales, polisacáridos y compuestos bioactivos que mejoran el crecimiento vegetal, la resistencia al estrés y la calidad de los cultivos [12]; [13]. Los bioestimulantes elaborados a partir de residuos de pescado y algas se aplican en diversas hortalizas, como la lechuga, acelga, espinaca, etc [11]. Debido a esto, el desarrollo radicular y la productividad incrementa debido al efecto positivo en la biomasa [1]; [14].

La agricultura peruana es altamente dependiente al uso de fertilizantes inorgánicos, donde el 89.5% han sido importados en el 2022 [15]. Aun así, en el 2025, las importaciones de los fertilizantes ascendieron a 378 millones de dólares siendo la urea el principal producto adquirido que viene a ser la principal fuente de nitrógeno para las plantas [16]. Frente a ello, resulta necesario impulsar alternativas más sostenibles, como bioestimulantes a partir de residuos del sector pesquero aplicables en cultivos como la lechuga, que permitan reducir costos e impactos ambientales [10].

En la actualidad, en la capital del Perú, Lima, específicamente en el distrito de Chorrillos, el mercado Los Cedros presenta una gestión deficiente de los residuos sólidos generados por los comerciantes minoristas de pescado y mariscos. El propósito de este trabajo es evaluar el índice de germinación de semillas de *Lactuca Sativa* variedad Tropicana tratadas con un bioestimulante a base de residuos de pescado combinados con alga parda en comparación con un bioestimulante elaborado únicamente con algas, a través del análisis de fitotoxicidad.

II. METODOLOGÍA

Para la elaboración del bioestimulante, fue necesario contar con un sistema que permitiera mantener condiciones controladas de

fermentación [10]. Ante la indisponibilidad de un biorreactor convencional, se diseñó y adaptó un sistema artesanal utilizando un bidón de polietileno de 70 litros, acondicionado para simular condiciones operativas controladas. En este caso, el control de variables fue limitado, lográndose únicamente la regulación de la temperatura mediante un sistema de intercambio de calor tipo baño maría, que permitió mantener rangos térmicos relativamente estables durante la operación, complementado con monitoreo instrumental de temperatura y pH. La agitación se realizó de forma manual a intervalos definidos, lo que permitió cierto grado de homogenización del medio. No obstante, la falta de control automatizado variables críticas, así como la naturaleza discontinua de la agitación, limita la estabilidad operativa y favorece la formación de gradientes internos de concentración y transferencia de masa [17]. El objetivo principal de la adaptación fue mantener una temperatura constante de 40 °C durante siete días, rango óptimo para la actividad de las bacterias ácido-lácticas utilizadas en la fermentación. Para lograrlo, se implementó un sistema de calefacción y control térmico compuesto por un serpentín de acero inoxidable de 15 m de longitud, un termómetro digital con sonda de precisión ($\pm 0,1$ °C), una máquina de baño maría y una bomba de recirculación de agua, estos dos últimos equipos facilitados por la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). La instalación inició con la perforación de la tapa del bidón para introducir el serpentín, que actuó como intercambiador de calor interno. A través de este fluía agua caliente proveniente del baño maría, lo que permitió mantener estable la temperatura interna del sistema durante toda la fermentación.

El bioestimulante algas y residuos de pescado se elaboró con residuos de pescado de bonito, pampanito y jurel (vísceras, espinas, cabezas y aletas) recolectados en el mercado “Los Cedros”, ubicado en Chorrillos, Lima, Perú y algas pardas (*Macrocystis pyrifera*) recolectadas en zonas costeras del departamento de Ica, Perú, área representativa del litoral sur. El flujo de proceso fue el siguiente: recepción de algas pardas – molido – recepción de residuos de pescado – lavado – mezcla de residuos de pescado, algas pardas y agua (100°C) – mezclado de hidrolizado de residuos con un 10% de melaza agrícola y un 10% de bacterias ácido-lácticas comercial GarLac como inóculo a 40 °C por 7 días – colado – filtrado y envasado [10].

El bioestimulante comercial que está elaborado de algas, llamado CODI-ALGAE 35 AA adquirido de la empresa CODIAGRO, tiene una composición declarada de algas marinas (35%), aminoácidos libres (5%), potasio (3%) y factores estimulantes (44 ppm).

A. Tratamientos y diseño experimental

El bioensayo de fitotoxicidad evalúa cómo distintas dosis de una sustancia afectan a organismos de prueba para detectar posibles compuestos fitotóxicos o genotóxicos [18]. El ensayo de fitotoxicidad se realizó con el propósito de comparar el efecto de los bioestimulantes sobre la germinación y desarrollo

radicular de semillas de *Lactuca sativa* de la variedad Tropicana. Se aplicaron tres tratamientos principales, como se puede visualizar en la Tabla I.

TABLA I

TRATAMIENTOS APLICADOS EN LA PRUEBA DE FITOTOXICIDAD

Tratamiento	Descripción
T0	Control (agua destilada)
T1	Bioestimulante con residuos de pescado y algas
T2	Bioestimulante comercial (Solo con algas)

Para cada tratamiento se realizó diluciones logarítmicas del extracto ($10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$) con agua destilada en relación 9:1 (9 mL de agua destilada y 1 mL de extracto) con seis repeticiones, se utilizó 20 semillas por repetición [10]. Las semillas se colocaron sobre papel filtro en placas Petri (90 mm), humedecidas con 4 mL de cada solución, y se incubaron en oscuridad a $25 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$ durante cinco días [18].

B. Método de evaluación de la germinación

Se adaptó una metodología para bioestimulantes líquidos [18]. Después de realizar el ensayo de fitotoxicidad durante 120 horas, del 30 de octubre al 3 de noviembre, se contabilizó el número de semillas germinadas en cada placa Petri y se midió la longitud de la radícula de lechuga desde la semilla hasta la raíz con un vernier metálico (mm) [18]. Una vez obtenidos los datos se evaluaron en el programa R 4.5.1 [19], donde fue procesada la interacción de las diluciones usadas y el índice de germinación (IG) [18]. La fitotoxicidad se determinó a partir del IG, integrando el porcentaje de germinación relativa (PGR) y el crecimiento de radícula relativo (CRR) según las siguientes ecuaciones [20]:

$$\text{PGR}(\%) = \frac{\text{Número de semillas germinadas con la muestra de agua problema}}{\text{Número de semillas germinadas en agua dura (testigo)}} * 100 \quad (1)$$

$$\text{CRR}(\%) = \frac{\text{Longitud promedio de la radícula con la muestra de agua problema}}{\text{Longitud promedio de la radícula en agua dura (testigo)}} * 100 \quad (2)$$

$$\text{IG}(\%) = \text{PGR} * \text{CRR} / 100 \quad (3)$$

El IG representa un indicador integral del grado de fitotoxicidad de un material orgánico [21]. Los valores se interpretaron de la siguiente manera:

- IG > 80%: No fitotóxico, apto para uso agrícola.

- $50 \% \leq IG \leq 80 \%$: inhibición leve.
- $IG < 50 \%$: fitotoxicidad moderada o severa.

C. Análisis estadístico

Los datos fueron analizados mediante la estimación de densidad para observar las diferencias entre ellos se usó el programa R, versión 4.5.1. [19]. Se realizó un análisis ANOVA ($\alpha = 0.05$) para determinar diferencias significativas entre tratamientos con sus respectivas pruebas de cumplimiento de supuestos (Prueba de Normalidad, Homoscedasticidad e Independencia de errores) y posteriormente la prueba de Tukey.

D. Métodos analíticos complementarios

La conductividad eléctrica (CE) y el pH de las soluciones se midieron con un potenciómetro de pH (marca Hanna) y un conductímetro Oakton con 150, respectivamente.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El bioestimulante registró un pH inicial de 6.2, al séptimo día de fermentación descendió a 4.62. La fuente de nitrógeno (N) proveniente del pescado favoreció la actividad microbiana, permitiendo que la melaza y el inóculo actuaran de manera eficiente bajo las condiciones establecidas, lo que explicó la disminución progresiva del pH [1]. De acuerdo con [22], mantener una proporción de melaza de 7% a 10% y un inóculo entre 10% y 15% garantiza una adecuada producción de ácido láctico por parte de las bacterias ácido-lácticas, favoreciendo la estabilidad del proceso fermentativo.

Evaluación organoléptica

El bioestimulante líquido presentó inicialmente un olor intenso a pescado y un color marrón oscuro. A partir del séptimo día, el color se tornó café claro y el olor se redujo notablemente, adquiriendo un aroma suave a pescado y melaza, resultados similares a los reportados por [10] [23].

Evaluación del pH y conductividad eléctrica

TABLA II

EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS EN LOS BIOESTIMULANTES

Bioestimulantes	pH	CE (mS)
T1	4.6	34.6
T2	6.7	72.1
T1 + T2	5.6	54.3

Los resultados de la composición fisicoquímica del bioestimulante de algas y residuos de pescado (BA&P) se presentan en la Tabla III. El contenido de sólidos totales (311.67 g/L) y de materia orgánica en solución (272.22 g/L)

evidencia una elevada carga orgánica, característica común de los bioestimulantes líquidos obtenidos a partir de residuos orgánicos sometidos a procesos de fermentación o hidrólisis [24] y [25]. Al respecto, [10] reportaron valores elevados de materia orgánica en fertilizantes líquidos elaborados a partir de subproductos de trucha, indicando que esta fracción constituye la base funcional del producto, ya que incluye aminoácidos, péptidos y otros compuestos bioactivos asociados al tipo de residuos utilizados (trucha).

El contenido de macronutrientes del BA&P, mostrado en la Tabla III, destaco el nitrógeno (N) total (5 938.10 mg/L), fósforo (P) total (1 895.93 mg/L) y potasio (K) total (8 000 mg/L). Estos valores son comparables e incluso superiores a los reportados por [10], quienes obtuvieron concentraciones de N, P y K de 12 040 mg/L, 1 189 mg/L y 5 540 mg/L, respectivamente, en un fertilizante líquido obtenido por fermentación láctica de subproductos de trucha. Los bioestimulantes orgánicos líquidos derivados de residuos agroindustriales presentan una alta disponibilidad de macronutrientes [1], lo que favorece su aplicación como suplementos nutricionales en programas de fertilización foliar y fertirriego [10] y [26].

En cuanto a las concentraciones de calcio (Ca) (3 485 mg/L) y magnesio (Mg) (925 mg/L), también reportadas en la Tabla III, reflejan un aporte de cationes secundarios esenciales para el desarrollo vegetal [1]. La investigación de [10] registraron valores menores de Ca y Mg en fertilizantes líquidos, lo que sugiere que el BA&P presenta un perfil mineral enriquecido. La presencia de sodio (2 400 mg/L) debe ser considerada en la dosificación del producto, tal como advierten [27] quienes recomiendan diluciones adecuadas para evitar efectos osmóticos adversos en aplicaciones agrícolas.

TABLA III

EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS EN EL BIOESTIMULANTE

Parámetros	BA&P 1
Sólidos Totales (g/L)	311.67
M.O. en Solución (g/L)	272.22
N Total (mg/L)	5938.10
P Total (mg/L)	1895.93
K Total (mg/L)	8000.00
Ca Total (mg/L)	3485.00
Mg Total (mg/L)	925.00
Na Total (mg/L)	2400.00

Metales pesados

Los resultados del análisis de metales pesados del BA&P se muestran en la Tabla IV.

Las concentraciones de plomo (Pb), cromo (Cr) y cadmio (Cd) registradas en el bioestimulante se encuentran muy por

debajo de los límites máximos permisibles (LMP) establecidos en el Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Fertilizantes del Perú. En el caso del cadmio, la normativa establece un límite de 5 mg/kg, mientras que en la muestra analizada se obtuvo una concentración de 0.22 mg/kg, valor inferior al máximo permitido. La normativa española para fertilizantes líquidos clasifica los productos en tres categorías, siendo la Clase A la más estricta en cuanto al contenido de metales pesados (0.7 mg/Kg Cd). Este resultado es relevante debido a la alta movilidad del Cd en el suelo, la cual favorece su acumulación en las partes comestibles de las plantas [28].

Estos resultados concuerdan con los reportados por [10], quienes indicaron que los fertilizantes líquidos elaborados a partir de subproductos de trucha presentan bajas concentraciones de metales pesados como el Pb (0.6 mg/Kg), Cd (0.16 mg/Kg) y Cr (2.29 mg/Kg). Esta condición se atribuye a la baja bioacumulación de los elementos utilizados en las materias primas [29].

Investigaciones como [10] y [24] resaltan que el control de metales pesados constituye un criterio fundamental para asegurar la inocuidad ambiental de los bioestimulantes orgánicos, ya que concentraciones elevadas podrían generar riesgos de toxicidad vegetal y acumulación en el suelo. En este sentido, los valores presentados en la Tabla 4 confirman que el BA&P cumple con los LMP para uso agrícola.

TABLA IV

METALES PESADOS PRESENTES SEGÚN NORMATIVA DE FERTILIZANTES LÍQUIDOS DE ESPAÑA Y PERÚ

Metales pesados (mg/Kg)	España			Perú	BA&P 1
	Clase A	Clase B	Clase C		
Pb	45	150	200	150	1.04
Cd	0.7	2	3	5	0.22
Cr	70	250	300	100	1.15

Análisis microbiológico

Los resultados del análisis microbiológico del bioestimulante BA&P se presentan en la Tabla V. Se observó la ausencia de microorganismos patógenos indicadores de contaminación fecal, tales como coliformes fecales (< 3 NMP/mL), *Escherichia coli* (< 3 NMP/mL) y *Salmonella* sp. (ausencia en 25 mL). Estos resultados coinciden con lo reportado por [10] y [24], quienes señalaron que los procesos de fermentación láctica generan condiciones desfavorables para el desarrollo de patógenos, favoreciendo la estabilidad microbiológica del fertilizante líquido.

En cuanto al elevado recuento de bacterias ácido-lácticas (1.3×10^7 UFC/mL), reportado en la Tabla V, evidencia la presencia de un microbiota benéfico asociada al proceso de fermentación. Tanto [10] y [24] destacan que estas bacterias cumplen un rol clave en la conservación del bioestimulante y en la generación de compuestos bioactivos que pueden mejorar la actividad microbiana del suelo y la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

TABLA V

RESULTADOS DEL ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DEL BIOESTIMULANTE

Contenido	BA&P 1
Enumeración de coliformes fecales (NMP/ml)	< 3
Enumeración de <i>Escherichia coli</i> (NMP/ml)	< 3
enumeración/detección de <i>Salmonella</i> sp. en 25ml	Ausencia
Recuento de bacterias ácido lácticos (UFC/ml)	13×10^6

Fitotoxicidad

Las semillas de lechuga mostraron una respuesta positiva al bioestimulante diluido, ya que no se observó inhibición en la elongación de la radícula ni anomalías en el proceso de germinación. El índice de germinación, que integra ambos factores, permitió estimar la fitotoxicidad de manera integral [18].

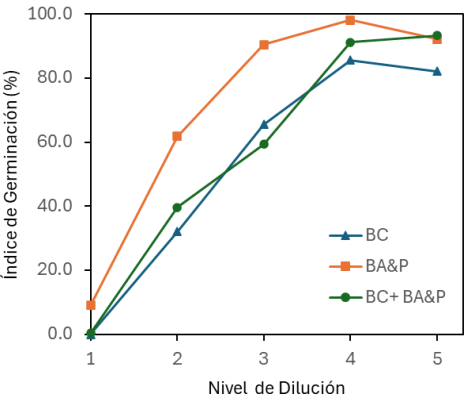


Fig. 1 Índice de germinación de las semillas de lechuga por tipo de bioestimulante en diluciones de 0.1% (1), 0.01% (2), 0.001% (3), 0.0001% (4) y 0.00001% (5)

Los resultados del IG demostraron que el ensayo con BA&P obtuvo los resultados más altos en comparación con el bioestimulante comercial (BC) seguido de la mezcla de BC en

un 50% con el BA&P en un 50% (BC+BA&P), destacando en la Fig. 1. El BC mostró menor Índice de germinación con un valor de 85.6% en comparación con el BA&P que obtuvo el porcentaje más alto de índice de germinación siendo 98.1% y el BC+BA&P con un valor de 93.3%.

Así mismo, los resultados del ANOVA de dos vías evidenciaron diferencias altamente significativas entre los tratamientos evaluados. El factor bioestimulante presentó un efecto significativo sobre el índice de germinación (IG) ($p = 9.937 \times 10^{-10}$), mientras que la dilución fue el factor de mayor influencia ($p < 2.2 \times 10^{-16}$). Asimismo, la interacción entre bioestimulante y dilución resultó altamente significativa ($p = 7.961 \times 10^{-11}$), lo que indica que el efecto de la dilución depende del tipo de bioestimulante aplicado.

Los resultados del ensayo confirmaron que el bioestimulante BA&P no presentó sustancias fitotóxicas ni genotóxicas, ya que se obtuvo un índice de germinación superior al 80%. Esto indica que los compuestos presentes en BA&P no interfieren con la elongación radicular ni generan anomalías durante la etapa de germinación de la lechuga Tropicana [18]. En la dilución al 10% de BA&P se registró un promedio de 15 semillas germinadas de 20 semillas expuestas; en cambio, en la misma dilución del BC no germinó ninguna semilla. Esta diferencia se atribuye al pH de 6.7 y a la conductividad eléctrica de 16.79 mS, valores que reflejan una alta concentración de sales que afectaron la germinación [10].

Estos hallazgos son consistentes pues, quienes evaluaron un abono líquido de lactosuero fermentado con heces de alpaca y obtuvieron un IG del 94.2% en diluciones bajas, superior a otras diluciones más concentradas [24]. Las altas concentraciones de nitrógeno o sales pueden inducir estrés durante la germinación, afectando el desarrollo inicial de la plántula [20]. De manera similar, cuando los minerales de los bioestimulantes provienen de fuentes vegetales, como el alga que contiene K, N y P, niveles elevados pueden inhibir el crecimiento radicular y la formación de la plántula [11]. Estos resultados destacan la importancia de seleccionar la dosis adecuada de bioestimulante para maximizar los efectos positivos sobre la germinación sin generar estrés en las semillas.

Diversos estudios internacionales han demostrado el potencial de los bioestimulantes para favorecer la germinación y mejorar la tolerancia de las plantas frente a condiciones adversas. Los investigadores [30] desarrollaron un bioestimulante a base de hidrolizado de trucha arcoíris, aplicando diferentes dosis en semillas de frijol y maíz, obteniendo una notable estimulación en la germinación. Entre los principales beneficios destacados fueron la inhibición del crecimiento de moho y una mejora positiva en condiciones a bajas temperaturas, alcanzando porcentajes de germinación hasta dos veces superiores al tratamiento control con una concentración del 1 % de hidrolizado. En la misma línea, [31] elaboró un bioestimulante a partir de microalgas, logrando índices de germinación superiores al 100 % con una concentración de 0.2 g/L, lo que evidencia la eficiencia de este

tipo de formulaciones en la promoción del crecimiento inicial de las plantas. Es así como los bioestimulantes elaborados a base de extractos de algas e hidrolizados fortalecen la resiliencia vegetal frente al estrés abiótico, favoreciendo el desarrollo de las plantas en condiciones ambientales desfavorables [32].

IV. CONCLUSIONES

El proceso de hidrólisis enzimática permitió la estabilización de residuos de pescado combinados con algas pardas para la obtención de un bioestimulante líquido, desarrollado durante un periodo de 168 horas.

Los análisis fisicoquímicos y microbiológicos evidenciaron que los residuos de pescado constituyen una fuente importante de nutrientes esenciales NPK para la formulación de fertilizantes orgánicos, y que, bajo condiciones controladas de fermentación láctica, es posible obtener resultados favorables. El índice de germinación obtenido fue comparable con el reportado en estudios previos, destacando que las diluciones de 0.001 % al 0.0001 % presentaron valores de IG superiores al 80 %, lo que indica la ausencia de compuestos fitotóxicos.

El bioestimulante elaborado a partir de algas pardas y residuos de pescado mostró los resultados más favorables, alcanzando un IG de 98.1 %, lo que evidencia un efecto positivo sobre el crecimiento radicular de la lechuga y una menor fitotoxicidad en comparación con el producto comercial. Asimismo, el análisis estadístico confirmó que el efecto de la dilución sobre el índice de germinación depende directamente del tipo de bioestimulante empleado.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos al Biólogo Juan Juscamaita de la Universidad Nacional Agraria La Molina por la mejor disposición de ayuda y asesoría para el desarrollar el proyecto de investigación y al Dr. Samuel Astete de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas por la orientación a lo largo de la investigación.

REFERENCIAS

- [1] H. Demir, İ. Sönmez, U. Uçan, and İ. H. Akgün, "Biofertilizers Improve the Plant Growth, Yield, and Mineral Concentration of Lettuce and Broccoli," *Agronomy*, vol. 13, no. 8, 2023, doi: 10.3390/agronomy13082031.
- [2] S. J. Sarandón and C. C. Flores, *Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de agroecosistemas sustentables*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP), 2014. Accessed: Oct. 05, 2025. [Online]. Available: <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/178603>
- [3] Y. González-León, J. Ortega-Bernal, M. A. Anducho-Reyes, and Y. Mercado-Flores, "Bacillus subtilis y Trichoderma: Características generales y su aplicación en la agricultura," *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, vol. 25, Dec. 2022, doi: 10.22201/fesz.23958723e.2022.520.
- [4] Y. Fang *et al.*, "Partial substitution of chemical nitrogen fertilizer with organic manure is more feasible than full substitution for soil phosphorus risk management," *Soil Tillage Res.*, vol. 256, p. 106847, Feb. 2026, doi: 10.1016/j.still.2025.106847.

- [5] ONU, "El mundo debe superar la era de los desechos y convertirlos en recursos," 2024. Accessed: Nov. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/el-mundo-debe-superar-la-era-de-los-desechos-y>
- [6] ITP, "Residuos de la pesca: aprovechamiento y valor agregado," 2018. Accessed: May 17, 2025. [Online]. Available: https://www.itp.gob.pe/archivos/vtic/PESCA_001-2018.pdf
- [7] FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), "The State of World Fisheries and Aquaculture 2022.," 2022, Accessed: May 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.fao.org/family-farming/detail/en/c/1565527/>
- [8] R. Thirukumaran, V. K. Anu Priya, S. Krishnamoorthy, P. Ramakrishnan, J. A. Moses, and C. Anandharamakrishnan, "Resource recovery from fish waste: Prospects and the usage of intensified extraction technologies," *Chemosphere*, vol. 299, p. 134361, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.134361.
- [9] ITP, "Tecnologías de producción y uso de fertilizantes orgánicos de residuos hidrobiológicos," 2022. Accessed: May 17, 2025. [Online]. Available: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3926390/Bolet%C3%ADn%20EC001-2022%20Tecnolg%20de%20prod%20y%20uso%20de%20fertilizantes%20org%20VsFinal.pdf.pdf?v=1670876840>
- [10] M. A. Florez Jalixto, D. J. Roldán Acero, and J. G. Juscamaita Morales, "EVALUACIÓN DE FITOTOXICIDAD Y CARACTERIZACIÓN DE UN FERTILIZANTE LÍQUIDO ELABORADO MEDIANTE FERMENTACIÓN LÁCTICA UTILIZANDO SUBPRODUCTOS DEL PROCESAMIENTO DE TRUCHA (*Oncorhynchus mykiss*)," *Ecología Aplicada*, vol. 19, no. 2, p. 121, Nov. 2020, doi: 10.21704/rea.v19i2.1563.
- [11] A. Álvarez-González *et al.*, "Environmental and economic benefits of using microalgae grown in wastewater as biofertilizer for lettuce cultivation," *Bioresour. Technol.*, vol. 424, 2025, doi: 10.1016/j.biortech.2025.132230.
- [12] S. Khan *et al.*, "Impact of amino acid supplementation on hydroponic lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth and nutrient content," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-00294-x.
- [13] J. S. Craigie, "Seaweed extract stimuli in plant science and agriculture," *J. Appl. Phycol.*, vol. 23, no. 3, pp. 371–393, Jun. 2011, doi: 10.1007/s10811-010-9560-4.
- [14] K. Methenni *et al.*, "Salicylic acid and calcium pretreatments alleviate the toxic effect of salinity in the Oueslati olive variety," *Sci. Hortic.*, vol. 233, pp. 349–358, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.scienta.2018.01.060.
- [15] MIDAGRI, "Panorama nacional e internacional del mercado de fertilizantes inorgánicos," 2022. Accessed: Oct. 05, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.midagri.gob.pe/jspui/bitstream/20.500.13036/1226/1/Mercado%20de%20fertilizantes%20inorg%C3%A1nicos.pdf>
- [16] PEV Centro de Información Agrícola, "Importaciones de fertilizantes por parte de Perú sumaron US\$378 millones en los primeros siete meses del presente año." Accessed: Oct. 05, 2025. [Online]. Available: <https://pev.com.pe/importaciones-de-fertilizantes-por-parte-de-peru-sumaron-us378-millones-en-los-primeros-siete-meses-del-presente-ano/>
- [17] L. M. Pinzón Naranjo and C. A. Sánchez Jiménez, "Aprovechamiento de las vísceras de pescado como fuente de energía para minimizar el problema de contaminación ambiental del sector piscícola," *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol. 7, no. 2, Dec. 2016, doi: 10.22490/21456453.1623.
- [18] María Cecilia Sobrero and Alicia Ronco, "Ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga *Lactuca sativa* L.," 2008. Accessed: Nov. 02, 2025. [Online]. Available: https://www.academia.edu/27791545/Ensayos_de_toxicidad_aguda_con_semillas_de_lechuga
- [19] "R 4.5.1." Accessed: Jan. 28, 2026. [Online]. Available: <https://cran.r-project.org/bin/windows/base/>
- [20] Alexis Joseph RODRÍGUEZ ROMERO, Cristopher Alberto ROBLES SALAZAR, Ricardo Arturo RUÍZ PICOS, Eugenia LÓPEZ LÓPEZ, Jacinto Elias SEDEÑO DÍAZ, and Angélica RODRÍGUEZ DORANTES, "ÍNDICES DE GERMINACIÓN Y ELONGACIÓN RADICAL DE *Lactuca sativa* EN EL BIOMONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RIO CHALMA," *SciELO*, 2014, Accessed: Nov. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.scielo.org.mx/pdf/rca/v30n3/v30n3a7.pdf>
- [21] R. C. & Varnero M. and Orellana R., "Índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje," *Revista de Ciencia del suelo y nutrición vegetal*, vol. 7, no. 1, pp. 28–37, 2007, Accessed: Nov. 02, 2025. [Online]. Available: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-27912007000100003
- [22] Binod Bihari Sahu *et al.*, "Fusion of sugar industry and fish processing industry waste products in developing high value organic fertilizer and feed supplement," *International Journal of Fisheries and Aquatic Research*, 2017, Accessed: Nov. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.fishjournals.com/assets/archives/2017/vol2issue4/1-2-22-455.pdf>
- [23] Aranganathan and Radhika Rajasree S.R., "Bioconversion of marine trash fish (MTF) to organic liquid fertilizer for effective solid waste management and its efficacy on Tomato growth," *Management of Environmental Quality*, 2016, Accessed: Nov. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.emerald.com/meq/article-abstract/27/1/93/284385/Bioconversion-of-marine-trash-fish-MTF-to-organic?redirectedFrom=fulltext>
- [24] H. Quiñones Ramirez, W. Trejo Cadillo, and J. Juscamaita Morales, "EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE UN ABONO LÍQUIDO PRODUCIDO VÍA FERMENTACIÓN HOMOLÁCTICA DE HECES DE ALPACA," *Ecología Aplicada*, vol. 15, no. 2, p. 133, Dec. 2016, doi: 10.21704/rea.v15i2.753.
- [25] J. Zhao, H. Ni, B. Wang, and Z. Yang, "Fish protein fertilizer serves as a sustainable alternative, improving soil properties, bamboo growth and shoots yield in Lei bamboo forests," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-88503-5.
- [26] J. Ling *et al.*, "Soil organic carbon thresholds control fertilizer effects on carbon accrual in croplands worldwide," *Nat. Commun.*, vol. 16, no. 1, 2025, doi: 10.1038/s41467-025-57981-6.
- [27] Balraj Thendral Hepsibha and Arumugam Geetha, "Physicochemical characterization of traditionally fermented liquid manure from fish waste (Gunapaselam)," *Indian Journal of Traditional Knowledge*, 2019, doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28751.23206>.
- [28] R. Chen, Z. Liu, J. Yang, T. Ma, A. Guo, and R. Shi, "Predicting cadmium enrichment in crops/vegetables and identifying the effects of soil factors based on transfer learning methods," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 291, p. 117823, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.ecoenv.2025.117823.
- [29] J. Cabell *et al.*, "Suitability of Residues from Seaweed and Fish Processing for Composting and as Fertilizer," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 16, 2024, doi: 10.3390/su16167190.
- [30] N. Nuzhyna *et al.*, "Fish Hydrolysates as Potential Biostimulants for Growing Legumes and Cereals to Reduce Temperature Stress," *Open Agric. J.*, vol. 18, no. 1, Sep. 2024, doi: 10.2174/0118743315337010240830071253.
- [31] M. L. Rabhi, L. Derbak, H. Bendif, F. Boufahja, A. M. Abu-Elsaoud, and S. Garzoli, "Seaweed-derived biostimulants for sustainable crop production: A review," *J. Biotechnol.*, vol. 408, pp. 201–216, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.jbiotec.2025.09.013.
- [32] A. Ferreira *et al.*, "Bioprocess to produce microalgae/biofertilizers based on microalgae grown using piggery wastewater as nutrient source," *Bioresour. Technol.*, vol. 414, p. 131619, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.biortech.2024.131619.