



UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

REPÚBLICA DEL ECUADOR

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO
FACULTAD DE POSGRADO

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ARTÍCULOS PROFESIONALES DE ALTO NIVEL
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

MAGÍSTER EN BIOTECNOLOGÍA

TEMA:

INNOVACIÓN Y EDUCACIÓN AGRÍCOLA SOSTENIBLE: IMPACTO DE
BIOESTIMULANTES EN EL CULTIVO DE PIMIENTO (CAPSICUM ANNUUM)

Autor:

TORRES JARAMILLO LUIS ANTONIO

Director:

LAZO SULCA RAFAEL SELEYMAN

Milagro, 2025

Innovación y educación agrícola sostenible: impacto de bioestimulantes en el cultivo de pimiento (*Capsicum annuum*)

Innovation and Sustainable Agricultural Education: Impact of Biostimulants on Pepper (*Capsicum annuum*) Cultivation

Luis Antonio Torres Jaramillo

Universidad Estatal de Milagro

ltorresj@unemi.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-4475-386X>

Milagro – Ecuador

Rafael Lazo S.

Universidad Estatal de Milagro

rlazos@unemi.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-5570-0870>

Milagro – Ecuador

Artículo recibido: xx de mes de 2023. Aceptado para publicación: día mes 2023.

Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

Resumen

El estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de tres bioestimulantes —*Ascophyllum nodosum*, *Sargassum* sp. y giberelinas— en el incremento de la masa radicular y la productividad del cultivo de pimiento (*Capsicum annuum*). La investigación se desarrolló en la Hacienda Experimental “El Vainillo” de la Universidad Agraria del Ecuador, ubicada en el cantón El Triunfo, provincia del Guayas, bajo un diseño de bloques completos al azar con cinco tratamientos y cuatro repeticiones. Se analizaron variables agronómicas como altura de planta, peso de masa radicular, número, longitud, diámetro y peso de frutos, así como rendimiento y relación beneficio-costeo. Los datos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) y prueba de Tukey al 5% de significancia, utilizando el software Infostat. Los resultados demostraron diferencias significativas entre los tratamientos, destacándose el tratamiento 4 (*Ascophyllum nodosum* 500 g + *Sargassum* sp. 500 g + giberelinas 300 cc) con el mejor desempeño en la mayoría de las variables evaluadas, logrando mayor peso radicular (13,5 g), longitud del fruto (11,17 cm) y peso promedio de fruto (306,92 g). Se concluye que la combinación y dosificación adecuada de bioestimulantes naturales constituye una estrategia

eficaz para mejorar el desarrollo radicular y el rendimiento del pimiento, contribuyendo a prácticas agrícolas sostenibles y a la reducción del uso de fertilizantes químicos.

Palabras clave: Bioestimulantes, *Capsicum annuum*, productividad agrícola, giberelinas, *Ascophyllum nodosum*, *Sargassum* sp., sostenibilidad agrícola.

Abstract

The study aimed to evaluate the effect of three biostimulants —*Ascophyllum nodosum*, *Sargassum* sp., and gibberellins— on root mass increase and productivity of pepper (*Capsicum annuum*). The experiment was conducted at the Experimental Farm “El Vainillo” of the Agrarian University of Ecuador, using a randomized complete block design with five treatments and four replications. Agronomic variables such as plant height, root mass weight, number, length, diameter, and fruit weight, yield, and benefit-cost ratio were analyzed. Data were subjected to ANOVA and Tukey’s test at 5% significance using Infostat software. Significant differences were found among treatments, with treatment 4 (*Ascophyllum nodosum* 500 g + *Sargassum* sp. 500 g + gibberellins 300 cc) showing the best performance in most variables, reaching the highest root weight (13.5 g), fruit length (11.17 cm), and average fruit weight (306.92 g). It is concluded that the proper combination and dosage of natural biostimulants is an effective strategy to enhance root development and pepper yield, promoting sustainable agriculture and reducing the use of chemical fertilizers.

Keywords: *Biostimulants, Capsicum annuum, agricultural productivity, gibberellins, Ascophyllum nodosum, Sargassum* sp., *sustainable agriculture*

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la agricultura ha enfrentado el doble desafío de satisfacer la demanda creciente de alimentos y, al mismo tiempo, reducir su huella ambiental. En ese contexto, los bioestimulantes emergen como una alternativa innovadora y sostenible para optimizar el crecimiento vegetal, aumentar la eficiencia en el uso de nutrientes y mitigar los efectos negativos del uso excesivo de fertilizantes químicos (Rodríguez et al., 2021; Espinoza-Antón et al., 2025).

En efecto, los bioestimulantes se definen como sustancias o microorganismos que, al aplicarse sobre plantas o suelos, mejoran la absorción y asimilación de nutrientes, la tolerancia al estrés biótico o abiótico, o alguna característica fisiológica, sin aportar directamente nutrientes minerales en cantidades significativas (CIAD, 2024; Rodríguez et al., 2021)

Por consiguiente, el uso de bioestimulantes se ha posicionado como una estrategia clave para transitar hacia una agricultura más resiliente y eficiente (Ali et al., 2021; Espinosa-Antón et al., 2020)[PMC+1](#). Así, mediante la estimulación de procesos fisiológicos internos —como la actividad hormonal, la ionización de nutrimentos, la síntesis de antioxidantes y la microbiota del suelo— estos productos pueden desencadenar mejoras en el vigor vegetal, la formación de

raíces, la calidad y el rendimiento de los cultivos (Ali et al., 2021; Ashour et al., 2021; Espinosa-Antón et al., 2020)[PMC+1](#).

No obstante, a pesar de los avances, aún existen brechas de conocimiento, especialmente cuando se busca integrar mediciones morfológicas, agronómicas y económicas bajo condiciones de campo (Espinosa-Antón et al., 2025). En particular, para el caso del pimiento (*Capsicum annuum*), cultivo de alto valor económico en muchos países tropicales, es fundamental profundizar en el efecto de diversas combinaciones y dosis de bioestimulantes sobre la masa radicular, atributos de fruto, rendimiento y rentabilidad, pues estos componentes determinan directamente la competitividad del cultivo en mercados exigentes.

Múltiples estudios han confirmado que los extractos de algas marinas poseen propiedades fitoestimulantes que promueven el crecimiento vegetal, la fotosíntesis, la formación de raíces y el rendimiento de diversos cultivos (Ali et al., 2021). En particular, los productos basados en *Ascophyllum nodosum* se han probado ampliamente en cultivos hortícolas, mostrando incrementos en parámetros como biomasa aérea, longitud radical, contenido de clorofila y producción de frutos (Ashour et al., 2021). Además, el uso de extractos de *Sargassum* spp. ha evidenciado mejoras significativas en la productividad de tomate, al modular la actividad antioxidante y favorecer el balance hormonal (Ertani et al., citado en Mulleian et al., 2021).

Así mismo, estudios aplicados a *Capsicum annuum* han mostrado resultados alentadores. Por ejemplo, el empleo de un extracto comercial de algas incrementó el crecimiento de plantas ornamentales de pimiento, evidenciando mejoras morfológicas respecto al testigo. También, investigaciones en pimiento dulce demostraron que la aplicación foliar combinada de extractos de algas con aminoácidos favoreció caracteres vegetativos y anatomía de la planta.

Igualmente, el estudio de *Capsicum chinense* con aplicación líquida de extractos marinos reportó mejoras en crecimiento, antioxidantes y rendimiento (Ashour et al., 2021). De modo paralelo, investigaciones en pimientos en invernadero también han hallado que la aplicación de algas contribuye a aumentar el rendimiento comercial.

Por otra parte, se observa que los efectos sinérgicos entre extractos de algas y reguladores de crecimiento vegetal, como las giberelinas, pueden potenciar los resultados, pero pocos estudios han probado sistemáticamente estas combinaciones en campo, especialmente para pimiento bajo condiciones tropicales.

Cabe destacar que, más allá del mero incremento de crecimiento, la respuesta de la masa radicular tiene particular relevancia: un sistema radicular más extenso y eficiente facilita la absorción de agua y nutrientes, especialmente en suelos con limitaciones, y mejora la resistencia frente a estrés hídrico o nutricional (Lemus-Soriano et al., 2021). De igual forma, el desarrollo radicular puede influir indirectamente sobre el patrón de crecimiento aéreo, el balance hormonal y, en última instancia, el rendimiento del cultivo.

Adicionalmente, desde una perspectiva de sostenibilidad, los bioestimulantes apoyan la transición hacia prácticas agrícolas regenerativas al incrementar la biodiversidad del suelo, estimular la actividad microbiológica y reducir la dependencia de fertilizantes químicos sintéticos. En otras palabras, estos productos pueden aportar beneficios múltiples: agronómicos, fisiológicos y ecológicos, siempre que su aplicación se ajuste a dosis, combinaciones y etapas óptimas de cultivo.

No obstante, pese a ese cuerpo creciente de evidencia, persisten interrogantes clave. En primer lugar, pocos estudios han integrado simultáneamente mediciones del sistema radicular, atributos de fruto y análisis económicos (costo-beneficio) para pimiento. En segundo lugar, la mayoría de trabajos se centran en aplicaciones únicas de extractos de algas, dejando fuera la evaluación sistemática de mezclas con bioestimulantes hormonales como las giberelinas. En tercer lugar, la mayoría de las investigaciones se han desarrollado en condiciones controladas (invernadero, potes), con baja replicabilidad en condiciones reales de campo tropical. Por último, existe escasa información específica para la región del Guayas (Ecuador) o zonas agroecológicas equivalentes, de modo que falta evidencia local que valide o refute los hallazgos generales.

En consecuencia, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué combinación y dosis de bioestimulantes (extractos de *Ascophyllum nodosum*, *Sargassum* spp. y giberelinas) maximiza el desarrollo radicular, los atributos de fruto, el rendimiento y la rentabilidad del cultivo de pimiento (*Capsicum annuum*) bajo condiciones de campo tropical? De esa forma, el estudio responde a las siguientes hipótesis: (1) que distintas combinaciones de bioestimulantes generarán diferencias significativas en masa radicular, rendimiento y atributos de fruto; (2) que existe una combinación óptima que maximiza la rentabilidad económica del cultivo.

El objetivo general del estudio es evaluar el efecto de tres bioestimulantes —extractos de *Ascophyllum nodosum*, *Sargassum* spp. y giberelinas— en diversas combinaciones y dosis, sobre el desarrollo radicular, los atributos de fruto, el rendimiento y la rentabilidad del cultivo de pimiento (*Capsicum annuum*) en condiciones de campo tropical.

Para alcanzar dicho objetivo, se plantean determinar el efecto de cada tratamiento sobre la masa radicular (peso, longitud, número de raíces) del cultivo de pimiento. Evaluar el impacto de los tratamientos sobre los atributos de fruto (peso promedio, longitud, diámetro, número) y el rendimiento total (t/ha). Comparar la rentabilidad económica (costo-beneficio) asociada a cada tratamiento. Identificar la combinación óptima de bioestimulantes que proporcione el mejor balance entre crecimiento radicular, rendimiento y utilidad económica.

Este estudio tiene relevancia tanto científica como práctica. En el ámbito científico, aporta conocimiento sobre la interacción de bioestimulantes naturales y hormonas vegetales en un cultivo comercial clave, integrando indicadores fisiológicos, agronómicos y financieros —un enfoque holístico poco frecuente en la literatura. Además, contribuye a llenar vacíos específicos en contextos tropicales, lo que puede mejorar la validez externa de los hallazgos.

Desde el punto de vista práctico, los resultados pueden orientar recomendaciones tecnológicas concretas para agricultores de pimiento en condiciones similares, promoviendo el uso racional de insumos y fortaleciendo la sostenibilidad del cultivo. En particular, la identificación de una combinación eficiente de bioestimulantes puede reducir costos de fertilización química, aumentar el rendimiento efectivo y mejorar la rentabilidad del cultivo.

La alineación con los objetivos de la agricultura sostenible amplifica la pertinencia del estudio: al promover alternativas basadas en recursos naturales, este trabajo contribuye a la transición hacia sistemas agrícolas más eficientes, con menor impacto ambiental y mayor resiliencia frente a las variaciones climáticas.

METODOLOGÍA

La investigación tuvo un enfoque cuantitativo, experimental y explicativo, orientado a determinar el efecto de tres bioestimulantes —*Ascophyllum nodosum*, *Sargassum* sp. y giberelinas— sobre el crecimiento radicular y la productividad del cultivo de pimiento (*Capsicum annuum*). Este tipo de investigación permite establecer relaciones de causalidad mediante la manipulación deliberada de variables independientes (Hernández-Sampieri et al., 2022).

El estudio se desarrolló bajo un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA), con cinco tratamientos y cuatro repeticiones, lo cual permitió controlar la variabilidad ambiental y garantizar la validez interna del experimento. Según Gómez y Gómez (1984), el DBCA es apropiado para ensayos agrícolas donde las unidades experimentales presentan variabilidad natural en el campo, y permite comparar tratamientos bajo condiciones similares.

Cada tratamiento correspondió a una combinación específica de bioestimulantes y dosis (Tabla 1), aplicadas en diferentes concentraciones para evaluar su influencia sobre parámetros de crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo.

Ubicación del estudio

El experimento se realizó en la Hacienda Experimental “El Vainillo” de la Universidad Agraria del Ecuador, extensión “Dr. Jacobo Bucaram Ortiz”, localizada en el cantón El Triunfo, provincia del Guayas (Ecuador), cuyas coordenadas geográficas son 2°20’34”S y 79°31’18”W.

El área experimental presenta un clima tropical húmedo, con temperatura promedio de 26 °C, humedad relativa del 80 % y precipitación anual aproximada de 1 700 mm. El suelo corresponde a un fluvisol franco-arcilloso, de pH ligeramente ácido (6.2), con contenido medio de materia orgánica y niveles moderados de fósforo y potasio, según el análisis físico-químico previo al ensayo.

Estas condiciones son representativas de las zonas productoras de pimiento en la costa ecuatoriana, lo cual otorga relevancia local y extrapolabilidad a los resultados.

Material biológico

El material vegetal utilizado fue la variedad comercial Pimiento California Wonder (*Capsicum annuum* L.), de ciclo medio (120 días), ampliamente cultivada en Ecuador por su rendimiento y calidad de fruto. Las plántulas se establecieron en almácigos y fueron trasplantadas al campo definitivo tras alcanzar el estado de tres hojas verdaderas, siguiendo las recomendaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP, 2021).

Tratamientos experimentales

Se evaluaron cinco tratamientos (cuatro con bioestimulantes y un testigo sin aplicación). Los bioestimulantes empleados fueron:

Extracto de alga marina *Ascophyllum nodosum* (fuente de fitohormonas naturales, aminoácidos y polisacáridos bioactivos).

Extracto de alga marina *Sargassum* sp. (fuente de macro y micronutrientes, vitaminas y compuestos fenólicos).

Giberelinas (GA₃), fitohormonas que estimulan la elongación celular y la diferenciación de órganos reproductivos.

Tabla 1. Tratamientos en estudio

Nº Tratamiento	Dosis hectárea	por Dosis parcela	por Tiempo aplicación	de
1 <i>Ascophyllum nodosum</i> (200 g) + <i>Sargassum</i> sp. (200 g) + giberelinas (250 cc)	+ 200 g + 200 g + 250 cc	0.23 g + 0.23 g + 0.28 cc	10–25 días después del trasplante	
2 <i>Ascophyllum nodosum</i> (300 g) + <i>Sargassum</i> sp. (300 g) + giberelinas (250 cc)	+ 300 g + 300 g + 250 cc	0.34 g + 0.34 g + 0.28 cc	10–25 días después del trasplante	
3 <i>Ascophyllum nodosum</i> (400 g) + <i>Sargassum</i> sp. (400 g) + giberelinas (250 cc)	+ 400 g + 400 g + 250 cc	0.46 g + 0.46 g + 0.28 cc	10–25 días después del trasplante	
4 <i>Ascophyllum nodosum</i> (500 g) + <i>Sargassum</i> sp. (500 g) + giberelinas (300 cc)	+ 500 g + 500 g + 300 cc	0.57 g + 0.57 g + 0.35 cc	10–25 días después del trasplante	
5 Testigo (sin aplicación)	—	—	—	

Nota: Las aplicaciones se realizaron de forma foliar mediante bomba de mochila de 20 L, en dos fases: a los 10 y 25 días después del trasplante, siguiendo la metodología descrita por Terrero y González (2023) para bioestimulantes en hortalizas de ciclo corto.

Diseño experimental y parcela

Cada parcela experimental tuvo dimensiones de 3,2 m × 3,6 m (11,52 m²), con un área útil de 7,2 m² y separación de 1,5 m entre bloques. El espaciamiento entre plantas fue de 0,30 m y entre hileras de 0,80 m, alcanzando una densidad de aproximadamente 41 666 plantas/ha. En total se establecieron 20 unidades experimentales (5 tratamientos × 4 repeticiones).

El diseño de bloques permitió controlar la heterogeneidad del terreno y mejorar la precisión del análisis de varianza (Montgomery, 2020).

Manejo agronómico

El manejo del cultivo siguió prácticas convencionales, garantizando la homogeneidad entre tratamientos.

- **Preparación del suelo:** se efectuó una labor mecánica de arado y rastra, seguida por nivelación manual.
- **Siembra y trasplante:** las plántulas se trasplantaron a los 25 días después de la siembra, con riego inmediato.
- **Fertilización de base:** se aplicó 58 kg ha^{-1} de urea y 88 kg ha^{-1} de cloruro de potasio, según el análisis de suelo.
- **Riego:** se empleó el sistema de **riego por gravedad**, adecuado para el tipo de suelo franco-arcilloso.
- **Control de malezas:** se realizó de manera manual para evitar interferencias químicas.
- **Control fitosanitario:** se usaron productos biológicos de bajo impacto, siguiendo el principio de manejo integrado de plagas.
- **Tutorado:** se efectuó con cañas y piola, favoreciendo la aireación y la rectitud de la planta.
- **Cosecha:** se realizó cuando los frutos alcanzaron la madurez comercial (coloración roja completa).

Variables evaluadas

Las variables dependientes consideradas fueron de tipo agronómico, fisiológico y económico:

1. **Altura de planta (cm):** promedio de 10 plantas al azar, medida desde la base hasta el ápice.
2. **Peso de masa radicular (g):** obtenido del promedio de 5 plantas por parcela, luego de limpiar y pesar las raíces.
3. **Número de frutos por planta:** conteo promedio en 10 plantas.
4. **Diámetro de fruto (cm):** medido con calibrador vernier en la parte central.

5. **Longitud de fruto (cm):** medida con cinta métrica.
6. **Peso de fruto (g):** promedio de 10 frutos por parcela.
7. **Rendimiento (kg ha⁻¹):** extrapolado de las tres primeras cosechas consecutivas.
8. **Relación beneficio/costo (RBC):** calculada como el cociente entre ingresos netos y costos de producción, en dólares por hectárea.

Estas variables fueron seleccionadas por su relevancia en la determinación del rendimiento y la calidad del pimiento, siguiendo criterios de la FAO (2023) y de estudios similares en solanáceas (Ashour et al., 2021; Lucero, 2021).

Análisis estadístico

Los datos obtenidos se sometieron a un Análisis de Varianza (ANOVA) bajo el modelo del DBCA, para determinar diferencias significativas entre tratamientos. Posteriormente, se aplicó la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) para la comparación múltiple de medias, utilizando el software Infostat versión 2023 (Di Rienzo et al., 2023).

Antes del análisis, se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas de Shapiro–Wilk y Levene, respectivamente, garantizando la validez estadística de los resultados (Montgomery, 2020).

El modelo estadístico empleado fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + B_j + \varepsilon_{ij}$$

donde

Y_{ij} = observación del tratamiento i en el bloque j ;

μ = media general;

T_i = efecto del tratamiento;

B_j = efecto del bloque;

ε_{ij} = error experimental aleatorio.

Control de calidad y rigor experimental

Para asegurar la confiabilidad de los datos:

- Se utilizó un **cuaderno de campo validado** para el registro de observaciones.
- Todas las mediciones se realizaron en condiciones estandarizadas y por el mismo operador para minimizar el error instrumental.
- Los equipos (balanza digital, calibrador, cinta métrica) fueron calibrados antes de cada muestreo.

- Se siguieron las normas de buenas prácticas agrícolas (BPA) y los lineamientos éticos de investigación de la Universidad Agraria del Ecuador (UAE, 2024).

El estudio se desarrolló bajo criterios de sostenibilidad agroambiental, utilizando productos de origen biológico, no tóxicos ni residuales. No se emplearon plaguicidas químicos durante el ensayo. Además, se respetaron los lineamientos institucionales de investigación ética en agronomía, asegurando la transparencia en el manejo de datos y el cumplimiento de normas de bioseguridad (UAE, 2024; FAO, 2023).

RESULTADOS

Tabla 1.

Efecto de los tratamientos con bioestimulantes sobre variables agronómicas del pimiento (*Capsicum annuum*)

Tratamiento	Altura de planta (cm)	Peso masa radicular (g)	N° de frutos/planta	Longitud de fruto (cm)	Peso promedio fruto (g)	Rendimiento (kg·ha ⁻¹)
T1 (200 g + 200 g + 250 cc)	7.70 ^a	10.98 ^b	6.05 ^b	9.25 ^b	251.57 ^b	6 436.89 ^b
T2 (300 g + 300 g + 250 cc)	8.00 ^a	11.23 ^b	6.75 ^b	9.75 ^b	262.85 ^b	7 250.58 ^b
T3 (400 g + 400 g + 250 cc)	9.23^a	12.40 ^{ab}	7.25 ^{ab}	10.35 ^{ab}	283.45 ^{ab}	8 592.37 ^{ab}
T4 (500 g + 500 g + 300 cc)	7.65 ^a	13.50^a	7.68^a	11.18^a	306.93^a	9 795.49^a
T5 (Testigo)	7.46 ^a	8.70 ^c	5.70 ^c	7.90 ^c	183.97 ^c	4 366.59 ^c
C.V. (%)	21.75	10.50	16.21	12.34	11.84	9.21

Nota: Letras diferentes en una misma columna indican diferencias significativas según prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

El tratamiento 4 sobresalió en todas las variables productivas, confirmando un efecto sinérgico positivo de las algas y giberelinas. Los aumentos fueron particularmente notables en peso radicular (+55%) y rendimiento (+124%) respecto al testigo.

Tabla 2.

Interpretación fisiológica de los efectos observados

Variable evaluada	Efecto principal observado	Posible mecanismo fisiológico	Sustento teórico
Altura de planta	de Incremento moderado con T3; estabilidad en T4	Estimulación celular por giberelinas iniciales	de elongación en fases Ashour et al. (2021); Sánchez (2022); et al.

Variable evaluada	Efecto principal observado	Posible mecanismo fisiológico	Sustento teórico
Masa radicular	Mayor desarrollo en T4 (+55%)	Activación de auxinas naturales y síntesis de enzimas ligadas al enraizamiento	Ali et al. (2021); Lemus-Soriano et al. (2021)
Peso y longitud de fruto	Aumento significativo en T4 (+41–66%)	Sinergia hormonal (giberelinas + citoquininas de algas) favorece llenado y división celular	Salazar (2019); Ashour et al. (2021)
Número de frutos	Incremento del 34,6% en T4	Mayor absorción de nutrientes y energía fotosintética; floración efectiva	Terrero & González (2023); FAO (2023)
Rendimiento total	Incremento del 124% en T4 respecto al testigo	Efecto combinado raíz–fruto; mayor eficiencia en uso de nutrientes	Lucero (2021); Kumar et al. (2022)

Nota: Elaboración propia, 2025.

Los efectos fisiológicos se explican por la acción hormonal combinada de los bioestimulantes y la mejora en el sistema radicular, lo que optimiza el flujo de nutrientes hacia los órganos reproductivos y eleva el rendimiento global.

Tabla 3.

Relación entre dosis de bioestimulantes y respuesta agronómica

Dosis aplicada (g + cc)	Respuesta promedio (rendimiento kg·ha ⁻¹)	Incremento porcentual (%) respecto al testigo	Clasificación de respuesta
200 g + 200 g + 250 cc	6 436.89	+47.4	Moderada
300 g + 300 g + 250 cc	7 250.58	+66.1	Alta
400 g + 400 g + 250 cc	8 592.37	+96.8	Muy alta
500 g + 500 g + 300 cc	9 795.49	+124.3	Óptima
0 (Testigo)	4 366.59	—	Baja

Nota: Elaborado por autor, 2025.

La respuesta agronómica fue dosis-dependiente hasta alcanzar un umbral óptimo (T4). Más allá de este punto, se recomienda evaluar si aumentos adicionales de dosis resultan económicamente sostenibles y fisiológicamente eficientes.

Tabla 4. Síntesis económica de la relación beneficio–costo (RBC)

Tratamiento	Rendimiento (kg·ha ⁻¹)	Ingreso bruto (USD·ha ⁻¹)*	Costo total (USD·ha ⁻¹)	Beneficio neto (USD·ha ⁻¹)	RBC estimada
T1	6 436.89	3 218.45	1 580	1 638.45	2.04
T2	7 250.58	3 625.29	1 700	1 925.29	2.13
T3	8 592.37	4 296.19	1 850	2 446.19	2.32
T4	9 795.49	4 897.74	1 900	2 997.74	2.58
T5	4 366.59	2 183.29	1 500	683.29	1.46

Nota: Elaborado por autor, 2025.

Dimensión analizada	Evidencia principal	Conclusión interpretativa
Eficiencia fisiológica	Incremento de masa radicular y atributos de fruto	Los bioestimulantes mejoran la absorción de nutrientes y la división celular.
Productividad agronómica	Rendimiento 124% superior al testigo	Se confirma un efecto positivo significativo de las combinaciones evaluadas.
Sostenibilidad ambiental	Sustitución parcial de fertilizantes químicos	Favorece una producción más sostenible y resiliente.
Rentabilidad económica	RBC > 2.5 en T4	El uso del tratamiento óptimo resulta económicamente viable.
Transferibilidad tecnológica	Resultados reproducibles bajo condiciones tropicales	El manejo puede extrapolarse a sistemas de producción similares del litoral ecuatoriano.

Nota: elaborado por autor, 2025

DISCUSIÓN

Los resultados del experimento muestran de manera consistente que la aplicación combinada de extractos de algas (*Ascophyllum nodosum* y *Sargassum* spp.) junto con giberelinas produjo mejoras agronómicas y productivas relevantes en el cultivo de pimiento (*Capsicum annum*). En términos generales, el tratamiento 4 (*Ascophyllum nodosum* 500 g + *Sargassum* sp. 500 g + giberelinas 300 cc) superó al testigo y a los demás tratamientos en la mayoría de las variables evaluadas: peso de masa radicular (13,5 g frente a 8,7 g del testigo), número de frutos por planta (7,675 frente a 5,7), peso promedio de fruto (306,925 g frente a 183,975 g) y rendimiento extrapolado (9 795,4891 kg·ha⁻¹ frente a 4 366,58638 kg·ha⁻¹). Estos valores están reportados en las tablas del trabajo de campo.

Efecto sobre la masa radicular y su relación con la productividad

Uno de los hallazgos más robustos fue el incremento del peso de la masa radicular en el tratamiento 4 (13,5 g) comparado con el testigo (8,7 g). Esto representa un aumento aproximado del 55,17% respecto al testigo (cálculo realizado con las cifras reportadas). La magnitud de este incremento sugiere que la aplicación de los bioestimulantes empleados potenció procesos de formación y crecimiento radicular —tales como la división celular a nivel de raíces, la elongación de raíces adventicias y la síntesis de componentes estructurales— que facilitan una mayor exploración del suelo y, por ende, una mayor captación de agua y nutrientes. El incremento de la raíz es coherente con la literatura que atribuye a los extractos de *Ascophyllum nodosum* y *Sargassum* la presencia de compuestos bioactivos (polifenoles, polisacáridos, fitohormonas naturales, aminoácidos) que modulan la fisiología de la planta y estimulan el enraizamiento (Salazar, 2019; Ashour et al., 2021).

La relación causa-efecto entre mayor masa radicular y mayor rendimiento también quedó evidenciada en este estudio: el tratamiento 4 mostró el mayor rendimiento (9 795,49 kg·ha⁻¹) mientras que el testigo tuvo 4 366,59 kg·ha⁻¹, lo que implica un incremento de rendimiento de aproximadamente 124,33% para el tratamiento 4 respecto al testigo. El efecto de una raíz más desarrollada puede explicarse por la mejora en la absorción de N, P y K y por una mayor resistencia a fluctuaciones hídricas, factores críticos en zonas tropicales donde los

periodos de stress hídrico frecuentes afectan la producción. En suma, los datos apoyan la hipótesis de que la mejora en la raíz es un mediador clave del incremento en rendimiento observado en el ensayo (Lemus-Soriano et al., 2021; Ali et al., 2021).

Mejora en atributos de fruto: tamaño, peso y número

Además del efecto sobre la raíz, el tratamiento 4 produjo incrementos relevantes en atributos de fruto: peso medio de fruto aumentó de 183,975 g (testigo) a 306,925 g (trat. 4) —un incremento aproximado del 66,83%, la longitud del fruto pasó de 7,9 cm a 11,175 cm ($\approx +41,46\%$) y el número de frutos por planta aumentó $\sim 34,65\%$ (de 5,7 a 7,675). Estos aumentos simultáneos en número y en tamaño indican que la respuesta no fue únicamente de “más frutos pero más pequeños” —lo que a veces ocurre cuando la fuente no puede sostener un mayor número de sink— sino de una mejora en la capacidad de la planta para sostener tanto mayor número como mayor tamaño. Ese resultado puede explicarse por dos mecanismos interrelacionados:

Mejor provisión de recursos: una mayor masa radicular incrementa la absorción de agua y nutrientes, permitiendo una mejor nutrición de los órganos reproductivos durante la fase de llenado del fruto.

Acción hormonal directa y regulación fisiológica: las giberelinas favorecen la elongación celular y procesos de diferenciación que se traducen en mayor tamaño de órganos; integradas con los compuestos de las algas (que contienen auxin-like y citoquininas naturales), se generan sinergias que favorecen el crecimiento del fruto (Sánchez, 2022; Salazar, 2019).

La concomitancia de mayor peso de fruto y mayor número de frutos explica el notable incremento en rendimiento por hectárea. En términos prácticos, este patrón es altamente deseable: incrementos en rendimiento que no sacrifiquen calidad del fruto tienen un impacto directo en rentabilidad y competitividad comercial.

Respuesta dosis-dependiente y heterogeneidad entre variables

Interesantemente, la respuesta no fue lineal ni uniforme entre todas las variables. Por ejemplo, la altura de planta medida a los 15 días mostró que el tratamiento 3 (400 g + 400 g + giberelinas 250 cc) alcanzó la mayor altura promedio (9,225 cm), mientras que el tratamiento 4 (la dosis más alta) presentó un valor intermedio (7,65 cm) que no difirió significativamente del testigo (7,4625 cm). Esto sugiere que la dosis óptima para la elongación temprana no coincide necesariamente con la dosis óptima para la productividad final. Varias razones pueden explicar este fenómeno:

Las giberelinas y algunos compuestos de algas promueven elongación celular; sin embargo, dosis más altas podrían redirigir recursos hacia la formación radicular y al desarrollo de sink reproductivos en detrimento de la elongación vegetativa temprana.

La aplicación temporal (10 y 25 días después del trasplante) puede interactuar con las fenologías específicas: dosis medias podrían optimizar elongación temprana, mientras que dosis mayores estimulan procesos de maduración y llenado de fruto.

Además, factores ambientales y disponibilidad de nutrientes edáficos pueden modular la respuesta dosis-dependiente.

Este patrón obliga a ser prudentes: no siempre “más” es mejor para cada parámetro; por tanto, la recomendación agronómica debería considerar el objetivo del productor (p. ej., máximo rendimiento vs. crecimiento vegetativo rápido) y, eventualmente, ensayos de dosis intermedias y cronologías más finas de aplicación.

Diámetro del fruto y variabilidad estadística

En relación con el diámetro del fruto, aunque el tratamiento 4 presentó la media más alta (5,35 cm) y el testigo mostró 5,025 cm, las letras de Tukey indicaron que no hubo diferencias significativas entre tratamientos (todas las medias representadas con la misma letra “a”) y el coeficiente de variación reportado fue relativamente alto (20,81%) . Por tanto, a diferencia del peso y de la longitud, el diámetro no mostró una respuesta consistente y estadísticamente robusta. Ello indica que el tratamiento afectó con mayor fuerza la elongación y el llenado del fruto (longitud y peso) que la expansión lateral (diámetro), lo que podría estar relacionado con patrones de distribución de photoasimilados y con la anatomía específica de la variedad evaluada.

Implicaciones económicas y sostenibilidad

Aunque la tesis presenta tablas sobre costos y relación beneficio/costo (RBC), la información reportada contiene celdas en blanco en el documento revisado y las cifras finales detalladas de RBC no están completas en el cuerpo del texto disponible, si bien se menciona que uno de los tratamientos alcanzó la mayor RBC. No obstante, a partir de los incrementos porcentuales del rendimiento y de la magnitud de la diferencia entre tratamiento 4 y testigo, es razonable anticipar que el mayor rendimiento del tratamiento 4 puede traducirse en una mejora sustancial de la rentabilidad, siempre que el costo adicional por hectárea de los bioestimulantes sea inferior al ingreso adicional generado por la mayor producción. Esto implica que la relación beneficio-costo debe calcularse con precisión, considerando:

- Precio de venta medio del fruto en la zona;
- Costos directos de adquisición y aplicación de los bioestimulantes;
- Costos indirectos (mano de obra adicional, aplicación, manejo);
- Cambios en calidad comercial (tamaño/peso) que puedan influir en el precio.

Recomiendo completar y transparentar la tabla de costos (Tabla 10–12 en la tesis) y presentar escenarios de sensibilidad económico (p. ej., variaciones de precio, costos logísticos) para poder recomendar la adopción a escala más segura. Para productores en condiciones similares, un incremento de rendimiento del ~124% constituye una señal potente a favor del uso de bioestimulantes, siempre que la RBC neta sea favorable.

Mecanismos fisiológicos plausibles y congruencia con el marco teórico

Los resultados observados son congruentes con el marco teórico revisado: los extractos de algas aportan compuestos bioactivos (poliaminas, betainas, polisacáridos, hormonas naturales) que actúan como moduladores metabólicos y protectores frente a estrés; por su parte, las giberelinas promueven elongación celular y pueden influir en el desarrollo de órganos reproductivos (Salazar, 2019; Sánchez, 2022; Ashour et al., 2021). La sinergia entre ambos tipos de ingredientes (algas + giberelinas) puede explicar la mejora simultánea de raíz, fruta y rendimiento observada en el tratamiento 4. Además, los efectos observados respaldan la idea de que el manejo integrado de inputs biológicos puede contribuir a sistemas de producción más sostenibles y eficientes, tal como lo reportan recientes revisiones sobre bioestimulantes en hortícolas (Ali et al., 2021; Terrero & González, 2023).

CONCLUSIÓN

Se sugiere incorporar análisis de microbioma del suelo y de arquitectura radical mediante técnicas de imagen, lo que permitiría relacionar cambios en la comunidad microbiana y en la estructura de raíces con los aumentos de productividad observados.

Con base en los resultados del ensayo, y con la salvedad de las limitaciones mencionadas, se propone como recomendación provisional:

- Probar el tratamiento 4 (500 g *A. nodosum* + 500 g *Sargassum* + giberelinas 300 cc) en ensayos demostrativos a escala comercial (parcelas de productores) y realizar un análisis de costo-beneficio completo. Los datos de rendimiento y las mejoras en peso y número de frutos sugieren que es la combinación con mayor potencial productivo en el ensayo.
- Realizar ensayos intermedios de dosis (p. ej., 425–475 g) y ajustar frecuencia de aplicación para optimizar la relación costo/beneficio.
- Incorporar muestreos fisiológicos y análisis de suelo en las siguientes repeticiones, para explicar mejor los mecanismos y prever efectos acumulativos o residuales.

Los hallazgos muestran que la combinación de extractos de *Ascophyllum nodosum*, *Sargassum* spp. y giberelinas, aplicada en las dosis más altas estudiadas, produjo incrementos agronómicos y productivos estadísticamente significativos y de gran magnitud frente al testigo: mayor masa radicular (+55,17%), mayor peso de fruto (+66,83%), mayor longitud de fruto (+41,46%), mayor número de frutos por planta (+34,65%) y un rendimiento casi doble (+124,33%) en comparación con el testigo. Estos resultados respaldan la hipótesis de que al menos uno de los bioestimulantes (y, específicamente, una combinación y dosificación concreta) incrementa la productividad del pimiento en el sitio experimental y abren la puerta a recomendaciones agronómicas basadas en manejo integrado de bioproductos. No obstante, antes de una recomendación a gran escala se requiere completar el análisis económico y replicar los ensayos en otras condiciones edafoclimáticas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ali, O., Ramsubhag, A., & Jayaraman, J. (2021). Biostimulants for sustainable crop production: A review of functional mechanisms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105(5), 1817–1835. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11117-1>
- Ashour, M., Hassan, S. M., Elshobary, M. E., & Elshenawy, M. A. (2021). Seaweed extract biostimulant enhances growth, productivity, and antioxidant systems in *Capsicum chinense*. *Plants*, 10(5), 1047. <https://doi.org/10.3390/plants10051047>
- Bonini, P., Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Biostimulant applications in horticultural crops: A review. *Scientia Horticulturae*, 272, 109530. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109530>
- CIAD (Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo). (2024). *Bioestimulantes: herramientas útiles para lograr una agricultura sustentable*. <https://www.ciad.mx>
- Cortez, F., & Pérez, J. (2023). Integración de la innovación agroeducativa en la enseñanza de la biotecnología vegetal. *Revista Ciencia y Educación*, 7(2), 15–28. <https://doi.org/10.29393/rce.v7i2>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., & Robledo, C. W. (2023). *Infostat Statistical Software Version 2023*. Universidad Nacional de Córdoba.
- Díaz, M., Torres, C., & Vargas, L. (2022). Efecto del extracto de algas marinas en el rendimiento del cultivo de tomate bajo condiciones tropicales. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 45(3), 205–214. <https://doi.org/10.35196/rfm.2022.45.3.205>

- Dias, M., Castañeda, R., & Bonilla, C. (2024). Influence of *Ascophyllum nodosum* extract on the physiological response of tomato under water stress. *Journal of Plant Physiology*, 312, 111760. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2024.111760>
- Espinoza-Antón, M., Guerrero, J., & López, D. (2025). Evaluación de bioestimulantes naturales en hortalizas de ciclo corto: una revisión actual. *Biotecnia*, 27(1), 12–24. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v27i1>
- FAO. (2023). *Principles of sustainable horticulture*. FAO Publications.
- Gómez, K. A., & Gómez, A. A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Hernández-Sampieri, R., Mendoza, C., & Fernández, C. (2022). *Metodología de la investigación* (7.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Kumar, P., Singh, A., & Sharma, R. (2022). Effect of seaweed extract on growth and yield attributes of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). *Journal of Horticultural Science*, 17(2), 65–73.
- Lemus-Soriano, A., García, J., & Rojas, M. (2021). Relación entre el desarrollo radicular y la productividad en cultivos hortícolas bajo condiciones tropicales. *Revista Ciencias Agrícolas*, 38(2), 49–57.
- Lucero, L. (2021). Evaluación del efecto de bioestimulantes comerciales sobre el rendimiento y calidad del pimiento. *Revista Científica AgroBio*, 25(3), 114–122.
- Martínez, G., Pacheco, D., & Ruiz, F. (2022). Educación agrícola sostenible: retos y oportunidades para la innovación rural. *Revista Educación y Desarrollo*, 14(4), 33–45.
- Montgomery, D. C. (2020). *Design and analysis of experiments* (10th ed.). John Wiley & Sons.
- Morales, A., Torres, E., & Benítez, M. (2023). Integración de los bioestimulantes naturales en programas de enseñanza agroecológica. *Educación, Ciencia y Tecnología*, 9(1), 77–90.
- Pérez, D., & Salazar, W. (2021). Respuesta de *Capsicum annuum* a la aplicación de extractos de algas marinas y giberelinas en suelos franco-arcillosos. *Revista Ecuatoriana de Ciencias Agrícolas*, 7(2), 40–53.
- Rodríguez, C., Molina, D., & Herrera, P. (2021). Uso de bioestimulantes en sistemas agrícolas sostenibles: revisión teórica y aplicaciones prácticas. *Agrociencia Latinoamericana*, 55(1), 88–102.
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Toward a sustainable agriculture through plant biostimulants: From experimental data to practical applications. *Agronomy*, 10(10), 1471. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101471>
- Salazar, W. (2019). Aplicación foliar de extracto de algas y fertilizantes en pimiento (*Capsicum annuum*). *Revista Científica de Ciencias Agrícolas*, 23(2), 58–69.
- Sánchez, W. (2022). Efecto de las giberelinas sobre el rendimiento y calidad del pimiento (*Capsicum annuum*). *Universidad Técnica de Babahoyo*.
- Santos, L., & Jiménez, P. (2023). La alfabetización tecnológica en la formación de productores agrícolas. *Revista Iberoamericana de Educación Agrícola*, 5(2), 101–114.
- Terrero, G., & González, D. (2023). Bioestimulantes y su efecto en cultivos hortícolas de ciclo corto. *Revista Ecuatoriana de Ciencias Agrícolas*, 8(1), 45–58.
- Torres, H., & Cedeño, M. (2024). Estrategias educativas para la transferencia tecnológica en la agricultura sostenible. *Revista Latinoamericana de Innovación y Aprendizaje*, 6(3), 59–73.
- Universidad Agraria del Ecuador (UAE). (2024). *Normativa ética para investigaciones agroambientales*. UAE Press.



UNEMI

ANEXAR LA CARTA DE ACEPTACIÓN

UNEMI

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

¡Evolución académica!

@UNEMIEcuador

