

Artículo de Investigación Original

Efecto bioestimulante a partir de *Chlorella vulgaris*: Una alternativa sostenible para la productividad agrícola

[Biostimulant effect from *Chlorella vulgaris*: A sustainable alternative for agricultural productivity]

Jairo Arevalo, Danna Lorduy, Juan Andrés Sandoval*, Carolina Torres Galeano

Universidad de América/ La Candelaria, Bogotá, Cundinamarca, Colombia.

(*Autor de correspondencia: juan.sandoval@uamerica.edu.co)

Resumen

La creciente preocupación por el impacto ambiental del uso excesivo de fertilizantes sintéticos ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles en la agricultura. En este estudio se evaluó el efecto bioestimulante de *Chlorella vulgaris* sobre plántulas de lechuga romana, como opción ecológica frente a fertilizantes convencionales. El cultivo de la microalga se realizó en biorreactores con medio BBM modificado, y la biomasa obtenida se separó mediante floculación con harina de semilla de moringa (eficiencia promedio 89.1 %). Se formularon bioestimulantes en tres concentraciones (baja, media y alta), aplicados de forma foliar y encapsulada en perlas de alginato. El diseño experimental incluyó 80 plántulas distribuidas en tratamientos con bioestimulante (foliar y encapsulado), un control negativo (sin fertilizante) y un control positivo con fertilizante químico (Triple 15). Se evaluaron altura, número y ancho de hojas, rigidez foliar, color y características radiculares. El fertilizante químico mostró el mayor crecimiento en altura y desarrollo foliar; las aplicaciones foliares en concentraciones baja y alta presentaron los mejores resultados entre los tratamientos bioestimulantes, mientras que las aplicaciones encapsuladas fueron menos efectivas por la baja solubilidad de las cápsulas en condiciones de alta humedad y bajas temperaturas. Se concluye que, aunque el bioestimulante no superó al fertilizante químico, mantuvo la salud de las plántulas y evidenció potencial, siendo recomendable optimizar el método de aplicación y considerar ambientes controlados para mejorar su desempeño.

Palabras clave: *microalga, fertilizante, bioestimulante, sostenibilidad agrícola, cultivo, plántula, lechuga romana.*

Abstract

The growing concern about the environmental impact of synthetic fertilizers has prompted the search for sustainable agricultural alternatives. This study evaluated the biostimulant effect of *Chlorella vulgaris* on romaine lettuce seedlings as an eco-friendly option compared to conventional fertilizers. The microalgae were cultivated in bioreactors with modified BBM medium, and biomass was harvested through flocculation with moringa seed flour (average efficiency 89.1%). Biostimulant formulations were prepared in three concentrations (low, medium, and high) and applied either foliarly or encapsulated in alginate beads. The experimental design included 80 seedlings divided into treatments with biostimulant (foliar and encapsulated), a negative control (no fertilizer), and a positive control with chemical fertilizer (Triple 15). Growth parameters such as plant height, leaf number and width, stiffness, color, and root characteristics were assessed. The chemical fertilizer achieved the highest growth in height and leaf development, while foliar applications at low and high concentrations outperformed the other biostimulant treatments. Encapsulated applications were less effective, likely due to poor capsule solubility under humid and cool conditions. Although the biostimulant did not surpass chemical fertilizer, it maintained seedling health and showed promising potential, warranting optimization of application methods and controlled growing conditions.

Keywords: *microalgae, fertilizer, biostimulant, agricultural sustainability, cultivation, seedling, romaine lettuce.*

Article Info: Received – August 29, 2025 // Received in revised form – September 02, 2025 //

Accepted – September 02, 2025 // Published – September 03, 2025

1. Introducción

El incremento poblacional global plantea desafíos significativos. Por ejemplo, UN (2024) estima que la población mundial continuará en ascenso, alcanzando un aproximado de 10,300 millones de personas para el año 2080, en contraste con los 8,200 millones registrados en 2024. Para asegurar la alimentación de esta creciente población, el sector agrario deberá producir enormes cantidades de alimentos. La salud del suelo es crucial para este objetivo, proveyendo nutrientes esenciales. Sin embargo, la FAO (2019) advierte que el uso excesivo o inadecuado de fertilizantes químicos contamina suelos y aguas. En específico,

el abuso de fertilizantes nitrogenados deteriora el suelo y contamina las fuentes hídricas. FAO (2002) subraya la necesidad de una aplicación precisa de nutrientes para evitar la lixiviación de nitratos y la consecuente contaminación. En Colombia, el sector agrícola desempeña un papel fundamental en la economía nacional, evidenciado por sus significativas cifras de exportación. Según datos del DANE (2025), las exportaciones de productos agropecuarios, alimentos y bebidas alcanzaron los 7,432.1 millones de dólares FOB entre enero y febrero de 2024, y ascendieron a 7,557.1 millones de dólares FOB en el mismo periodo de 2025, lo que representa un incremento del 1.7%. La importancia de la agricultura en la

economía colombiana ha sido resaltada por Hernández (2022), quien señala al país como una despensa mundial gracias a sus condiciones climáticas favorables, disponibilidad de agua y biodiversidad, factores que impulsan la productividad y amplias áreas cultivables. La producción agrícola en Colombia depende de manera considerable del uso de fertilizantes.

Las microalgas surgen como una alternativa a los fertilizantes sintéticos en Colombia. Estos microorganismos se adaptan a diversos ambientes y se clasifican por su nutrición (fotoautótrofas, fotoheterótrofas, mixotróficas y heterótrofas) (Ñaupari y Rojas, 2017). Poseen una biomasa rica en lípidos (20-30%), proteínas (40-50%) y otros compuestos (Lized, 2021). Maldonado (2023) señala que, similar a las macroalgas, las microalgas actúan como bioestimulantes. Esto se debe a su capacidad para producir metabolitos promotores del crecimiento (compuestos fenólicos, terpenoides, fitohormonas, entre otros) que protegen contra el estrés, combaten patógenos, estimulan el crecimiento y regulan procesos celulares. Entre las especies con actividad bioestimulante, Maldonado (2023) destaca a *Acutodesmus dimorphus*, *Scenedesmus quadricauda*, *Chlorella ellipsoidea* y *Chlorella vulgaris*.

Chlorella vulgaris es una microalga unicelular verde, con células esféricas de 2 a 10 μm , que posee un perfil nutricional rico y diverso (Safi *et al.*, 2014). Sus proteínas constituyen el 42-58% de su peso seco, y contiene lípidos (incluyendo ácidos grasos saturados) y carbohidratos en su compleja pared celular. Además, *Chlorella vulgaris* aporta micronutrientes esenciales como sodio, potasio, calcio, magnesio y fósforo, y se

distingue por sus concentraciones de vitaminas C, E y A.

Barone *et al.* (2017) demostraron en remolacha azucarera que la aplicación de *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus quadricauda* incrementó de manera relevante el desarrollo radicular (número de puntas, longitud total y área superficial), lo cual optimiza la absorción de agua y nutrientes, y mejora la competitividad de las plántulas. De manera similar, Faheed y Abd-El Fattah (2008) observaron en lechuga (*Lactuca sativa* L.) que la aplicación de biomasa algal (fresca y seca) a semillas germinadas promovió el crecimiento de la raíz y el tallo. En particular, el cultivo de microalgas durante tres días y la adición de extracto seco (2 y 3 g/kg de suelo) fueron los tratamientos más efectivos, sugiriendo una mejora en las propiedades del suelo y la estimulación de reacciones fisiológicas que favorecen el desarrollo vegetal.

En este contexto, se buscó evaluar, a escala de laboratorio, el efecto bioestimulante de *Chlorella vulgaris* sobre plántulas de lechuga romana (*Lactuca sativa* var. longifolia), elegidas por su rápido ciclo de crecimiento, alta sensibilidad a condiciones nutricionales y amplia utilización en ensayos de bioestimulación vegetal. Para alcanzar dicho objetivo, se propuso de forma específica: i) desarrollar un sistema de cultivo a escala de laboratorio que estableciera las condiciones óptimas para el crecimiento de *Chlorella vulgaris*, ii) validar un método de aplicación del bioestimulante adecuado para plántulas de *Lactuca sativa*, y iii) comparar la respuesta fisiológica de las plántulas tratadas con el bioestimulante frente a aquellas tratadas con un fertilizante sintético de uso comercial.

2. Materiales y Métodos

2.1 Obtención del cultivo de *Chlorella vulgaris*

El cultivo de *Chlorella vulgaris* se llevó a cabo en tres biorreactores de vidrio de 4 litros, protegidos con poliestireno para mantener la temperatura. La aireación se realizó con una bomba Atman AT-A6500 (110-120V/ 60Hz-3W) utilizando una manguera de silicón y una piedra difusora redonda. Para la iluminación, se utilizaron luces LED Mercury Promax con un flujo de 600 lm/m, controladas por un temporizador TS-WU3 (120V~ 60Hz 15A) que establecía los ciclos de luz y oscuridad. El medio de cultivo fue el Medio Basal de Bold (BBM) modificado (Nichols y Bold, 1965; Almeida, 2020).

Durante 11 días, se realizó un monitoreo diario del crecimiento algal midiendo la densidad óptica (DO) a 640 nm con un espectrofotómetro UV/VIS Genesys 20 de la marca Thermo Spectronic modelo 4001/4 con celdas de cuarzo (Bolaños y Victoria, 2019). Adicionalmente, se mantuvo (por debajo de 35 °C) un monitoreo de la temperatura

con un termómetro digital Waterproof, y el pH (establecido en 7 unidades) con un potenciómetro digital Apera Instruments.

2.2 Escalamiento del cultivo

Se incorporaron tres contenedores de vidrio adicionales de 4 litros de capacidad, elevando el número total de biorreactores a seis. En la Tabla 1 se expresan los diferentes volúmenes de medio de cultivo fresco y de suspensión algal proveniente del cultivo inicial para cada biorreactor.

En la Tabla 2 se presentan los datos del monitoreo diario de la densidad óptica y la temperatura. El pH se mantuvo en un valor neutro (pH 7) durante todo el proceso del crecimiento. En la misma Tabla se evidencia como en el transcurso del tiempo la DO iba aumentando. Los días 23 y 32 reflejan una disminución en estos valores de DO, debido a que se agregó medio de cultivo para sustentar el crecimiento continuo de las microalgas. En el día 32, se ajustó la cantidad añadida a cada biorreactor hasta completar el volumen máximo de 4 litros disponible en cada contenedor.

Tabla 1. Contenido volumétrico de los biorreactores

Biorreactor	Volumen inicial del medio de cultivo (L)	Volumen de suspensión algal (L)	Volumen final del biorreactor (L)
1	1.3	1.0	2.3
2	1.3	1.0	2.3
3	1.3	1.0	2.3
4	1.3	0.9	2.2
5	1.16	0.8	1.96
6	1.16	0.8	1.96

Tabla 2. Monitoreo diario de biorreactores, densidad óptica (DO) y temperatura (T, °C)

Día	Biorreactores											
	R1		R2		R3		R4		R5		R6	
	DO	T	DO	T	DO	T	DO	T	DO	T	DO	T
15	1.027	31.3	1.016	26.5	1.017	25.7	1.123	35.5	1.054	35.0	0.890	35.0
16	1.18	33.5	1.192	28.8	1.175	27.8	1.323	34.5	1.156	26.8	1.067	28.6
17	1.315	33.6	1.238	29.0	1.315	27.9	1.394	34.1	1.212	27.5	1.165	29.2
21	1.591	32.4	1.555	27.6	1.664	26.6	1.448	17.6	1.412	21.1	1.393	24.5
23	1.045	22.4	1.020	20.1	1.078	19.8	0.898	24.1	1.011	20.7	0.902	20.9
24	1.167	28.3	1.038	23.7	1.132	23.1	1.041	31.3	1.028	23.8	0.954	25.6
25	1.244	28.7	1.105	24.3	1.234	23.7	1.194	32.5	1.093	24.6	1.039	26.5
28	1.407	29.3	1.239	24.8	1.386	24.2	1.459	32.7	1.227	24.9	1.216	26.8
29	1.361	25.4	1.224	21.5	1.399	21.8	1.433	31.8	1.238	24.3	1.190	25.6
30	1.443	25.4	1.222	21.3	1.399	21.8	1.521	31.8	1.240	31.8	1.239	25.3
31	1.491	28.2	1.301	23.9	1.482	23.4	1.587	32.7	1.314	24.6	1.296	26.3
32	1.198	23.5	1.155	21.1	1.086	20.5	1.181	25.0	1.077	21.5	1.123	21.4

2.3 Separación del cultivo

Una vez alcanzado un volumen de 22 L de cultivo de *Chlorella vulgaris*, cuya reducción se atribuyó a la evaporación, se procedió a la separación de la biomasa para obtener un concentrado. Para este fin, se empleó un proceso de floculación por medio de un ensayo de jarras con un equipo E&Q F6-300 de 6 puestos (110V-250W), empleando harina de semillas de moringa oleífera como agente floculante natural. Las semillas maduras se consiguieron de la tienda “El Semillero SAS”, ubicada en la localidad de Barrios Unidos de Bogotá. Las semillas fueron descascaradas, molidas y tamizadas a 500 μm y 420 μm , siguiendo un protocolo descrito por Valderrama (2017). La solución floculante se preparó dispersando 1.0 g de la harina en 100 mL de agua desionizada (Oliveira *et al.*, 2018).

La eficiencia de floculación se evaluó mediante una prueba de jarras, cada

jarra con 1 L de cultivo de *Chlorella vulgaris*. Se agregó una dosis de 1.5 g de la solución floculante, previamente agitada, y con el pH cercano a 9 mediante NaOH 0.25 M (Valderrama, 2017). La agitación se realizó en dos etapas secuenciales: una rápida a 100 rpm durante 20 minutos, seguida por una lenta a 20 rpm durante 30 minutos. Finalmente, las jarras se dejaron en reposo durante un periodo mayor a 12 horas. Este procedimiento se replicó hasta tratar la totalidad del cultivo, dando lugar a 22 jarras de 1 litro. En la Tabla 3 se muestra la DO antes de la adición del floculante y después del periodo de sedimentación, que se determinó midiendo a una longitud de onda de 640 nm. Por último, se recolectó el sedimento algal concentrado mediante decantación del sobrenadante, obteniéndose aproximadamente 4 L de biomasa algal concentrada, para las siguientes etapas del estudio.

Tabla 3. Densidad óptica (DO): antes de la floculación y post- sedimentación

Jarra	DO inicial	DO final	Jarra	DO inicial	DO final
1	0.933	0.074	12	0.966	0.088
2	0.778	0.062	13	0.926	0.013
3	0.819	0.076	14	0.827	0.023
4	0.928	0.191	15	0.995	0.163
5	0.951	0.196	16	1.051	0.107
6	0.966	0.177	17	1.024	0.067
7	0.974	0.118	18	1.039	0.056
8	0.933	0.184	19	0.932	0.023
9	0.930	0.185	20	0.954	0.106
10	0.957	0.208	21	0.980	0.054
11	0.962	0.083	22	0.950	0.023

2.4 Caracterización de la biomasa concentrada

Una vez obtenida una cantidad suficiente de biomasa algal concentrada, se determinó su composición nutricional mediante la cuantificación de nitrógeno total, fosfatos, potasio, test de calcio, magnesio, manganeso, hierro y zinc; además de algunas propiedades fisicoquímicas, como la densidad, el pH y la conductividad eléctrica (ICA, 2003). La caracterización de la biomasa se realizó en la Universidad de América, empleando kits fotométricos de la marca MERCK: nitrógeno total (Nitrogen Total Cell Test 1.14537.0001), fosfatos (Phosphate Test 1.14848.0002), calcio (Calcium Cell Test 1.00858.0001), zinc (Zinc Cell Test 1.14566.0001), manganeso (Manganese Test 1.14770.0002) y hierro (Iron Cell Test 1.14549.0001). Las concentraciones de potasio, cobre y magnesio se evaluaron en un laboratorio externo.

2.5 Síntesis del bioestimulante

Para evaluar la influencia de la concentración algal en la actividad bioestimulante, se preparó un nivel de concentración de microalga basado en la densidad celular estimada a partir de la absorbancia. La concentración se definió en tres rangos: bajo (absorbancia de 0.1 a 0.5), medio (absorbancia de 0.5 a 1.0) y alto (absorbancia de 1.0 a 2.0).

La absorbancia de la biomasa concentrada, medida tras una dilución 1:10, fue de 0.549. Al aplicar el factor de dilución, la absorbancia estimada de la biomasa concentrada fue de 5.490. Utilizando las absorbancias objetivo de 0.5, 1.0 y 2.0 para las concentraciones baja, media y alta respectivamente. Se calculó el volumen de biomasa concentrada necesario para preparar 1 litro de cada dilución. Basándose en la densidad de la biomasa final, se prepararon tres concentraciones en un litro de solución: baja (92.8 g), media (185.6 g) y alta (371.2 g). Se prepararon dos soluciones de 1 litro para cada concentración. Una de estas soluciones se destinó a la aplicación foliar directa, mientras que la otra se utilizó para el encapsulamiento de las microalgas en perlas de alginato de calcio, con el objetivo

de comparar la eficacia de ambas formas de aplicación (foliar vs liberación lenta en las pruebas de campo).

2.5.1 Preparación de soluciones para aplicación foliar

Las soluciones preparadas para cada una de las tres concentraciones (baja, media y alta) se almacenaron en frascos de plástico de capacidad de almacenamiento de 1 litro para su posterior aplicación mediante aspersión foliar.

2.5.2 Encapsulamiento de microalgas en perlas de alginato de calcio

Este proceso, basado en una reacción de intercambio iónico entre el cloruro de calcio y el alginato de sodio, se ha aplicado en el ámbito del tratamiento de aguas residuales (Hernández, 2011) y en la creación de biofertilizantes (Hernández-Martínez *et al.*, 2022). El proceso siguió la metodología descrita por Navarro y Gouveia (2022), con algunas adaptaciones: primero se preparó una solución de alginato de sodio al 1% (p/v) disolviendo 3 gramos en 297 mL de agua destilada. Luego, se mezcló con biomasa concentrada de microalgas en una proporción de 20:80 (v/v). Esta mezcla se adicionó en forma de goteo controlado desde una bureta sobre una solución de cloruro de calcio (CaCl_2) al 1% (p/v) bajo agitación suave, permitiendo la formación de perlas que se dejaron reposar durante 5 minutos y por último se lavaron con abundante agua destilada para eliminar residuos.

2.6 Plántulas usadas para el ensayo

Se utilizaron 80 plántulas de lechuga romana verde tipo baby en etapa de crecimiento de 4 semanas, obtenidas del Centro de Biosistemas de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, ubicado en el municipio de Chía, Colombia. Cada una de las plántulas tuvo un estado inicial con seis hojas y una altura entre 6 a 7.5 cm, se trasplantaron de la bandeja de germinación a bolsas de vivero en el mismo sustrato en el que fueron entregadas, el cual fue tierra negra, y se mantuvieron al aire libre durante todo el ensayo.

2.7 Aplicación del bioestimulante

Cada tratamiento se aplicó con la frecuencia apropiada según su naturaleza: el bioestimulante en presentación líquida se administró por vía foliar cada 3 días, permitiendo una absorción rápida de los compuestos activos; las cápsulas de bioestimulante, formuladas con alginato de sodio, se incorporaron al sustrato alrededor de las raíces cada 7 días, en función de su lenta liberación controlada.

Por su parte, el fertilizante químico TRIPLE 15, en presentación sólida granular, se aplicó directamente al sustrato en una dosis de 2 gramos por bolsa de cultivo cada 15 días, esta dosis corresponde a una aplicación de 50 g/m², calculada según el área real de las bolsas utilizadas (0.04 m²). Se evitó el contacto directo con el tallo para prevenir quemaduras, y su frecuencia de aplicación buscó mantener un suministro constante de nutrientes sin inducir acumulación excesiva de sales, esta estrategia se basó en lo establecido en la ficha técnica del producto (Diproagro, 2021).

El desarrollo de las plántulas se monitoreó cada 14 días (Rather *et al.*, 2018). En la Tabla 4 se visualizan los 4 grupos experimentales para la comparación estadística. En total, el análisis estadístico comparativo se realizó

sobre 80 plántulas de lechuga. Los parámetros de evaluación fueron: número de hojas por plántula, ancho máximo de la hoja (en centímetros) y longitud máxima de la hoja (en centímetros).

Tabla 4. Diseño experimental y distribución de plántulas por tratamiento

Tipo de tratamiento	Número total de plántulas de lechuga	Color de identificación de las plántulas	Especificaciones
Blanco Negativo	10	Naranja	Estas plántulas no recibirán ningún tipo de fertilizante
Blanco Positivo	10	Rojo	Recibirán el fertilizante comercial (Triple 15)
Foliar	10	Verde oscuro	Cada plántula con una concentración del bioestimulante Alta
	10	Verde claro	Cada plántula con una concentración del bioestimulante Media
	10	Aguamarina	Cada plántula con una concentración del bioestimulante Baja
Granulado	10	Azul	Cada plántula con una concentración del bioestimulante Alta
	10	Morado	Cada plántula con una concentración del bioestimulante Media
	10	Amarillo	Cada plántula con una concentración del bioestimulante Baja

3. Resultados y Discusión

3.1 Cultivo, composición y separación

El producto base fue la biomasa concentrada de *Chlorella vulgaris*, obtenida tras la separación del cultivo. Su ficha técnica se presenta en la Tabla 5. Por

su parte, los datos de la Tabla 6 revelan que las concentraciones de macro y micronutrientes en la biomasa concentrada no exceden los límites de toxicidad para el crecimiento vegetal según la bibliografía consultada. Si bien el contenido nutricional de la biomasa concentrada (a excepción del Mn) no alcanza los rangos de suficiencia para ser biofertilizante, se

puede clasificar como bioestimulante, en correlación con la Resolución 150 del ICA (2003), la cual define un bioestimulante como una "sustancia de ocurrencia natural o producida en biofermentadores que, sin ser regulador fisiológico de plantas, altera

el comportamiento de la planta ante su ecosistema...". Esta alteración incluye la mejora del metabolismo, la producción, la resistencia al estrés y, mejora el desarrollo radicular (Barone *et al.*, 2017; Del Prete *et al.*, 2025).

Tabla 5. Ficha técnica de la biomasa de *Chlorella vulgaris* concentrada

Características	Biomasa madre
Macronutrientes	
Nitrógeno (N, %)	0.0015
Fósforo (P, %)	0.0189
Potasio (K, %)	9.8138 x 10 ⁻⁶
Calcio (Ca, %)	0.0863
Magnesio (Mg, %)	0.0129
Micronutrientes	
Zinc (Zn, ppm)	3.9648
Manganeso (Mn, ppm)	75.9587
Hierro (Fe, ppm)	14.6422
Cobre (Cu, ppm)	2.4534
Parámetros fisicoquímicos	
Densidad (g/mL)	1.019
Conductividad eléctrica (dS/m)	1.2
pH	7.6

Tabla 6. Comparación de los resultados experimentales de la biomasa concentrada obtenidos en este estudio con la literatura.

Referencia	N	P	K	Ca	Mg	Zn	Mn	Fe	Cu
	%			ppm					
Este estudio	0.001	0.019	9.81 x10 ⁻⁶	0.086	0.0129	3.964	75.958	14.642	2.453
Carrendo y García (2012)	2.0-50	0.2-0.5	1.0-5.0	0.1-0.3	0.1-0.4	20-100	20-300	50-250	5.0-20
Robledo (2021)	-	-	-	-	2.0-5.0	20-100	20-300	50-250	5.0-20
Campbell (2009)	4.5-6.5	0.3-0.8	0.6-10	1.0-2.0	0.35-0.75	20-75	20-200	50-200	5.0-15

Cumpliendo con la Resolución 150 del ICA (2003), se obtuvo un bioestimulante con densidad de 1.019 g/cm³, un pH de 7.6 y una conductividad eléctrica (CE) de 1.2 dS/m. Estos valores son clave para entender su interacción con los cultivos de lechuga. El pH óptimo para la lechuga es un aspecto variable. Mientras que Vanegas *et al.* (2010) y Corradini (2023) sugieren rangos entre 6.0 y 7.0 o 6.0 y 6.5 respectivamente, Nolberto y Avila (2023) indican un rango de 6.8 a 7.4, enfatizando la sensibilidad de la planta a pH extremos.

En cuanto a la conductividad eléctrica, Nolberto y Ávila (2023) recomiendan que el suelo tenga una CE inferior a 3.5 dS/m para una óptima absorción de agua y nutrientes. Con una CE de 1.2 dS/m, este bioestimulante no afectará de forma negativa la

conductividad del suelo en los cultivos de lechuga.

Los porcentajes de eficiencia del proceso de floculación mostrados en la Figura 1, presentan un rango entre 78.3% (jarra #10) y 98.6% (jarra #13), con un promedio de 89.1%. Valderrama (2017) obtuvo eficiencias máximas de 71.33% (pH 8.5) utilizando 1.4 g/L de harina de semilla de moringa. Los resultados del presente estudio, superiores (98.6% con 1.5 g/L a pH 9), se atribuyen en principio a un tiempo de sedimentación extendido durante 20 horas. Aunque la autora no observó mejoras a pH básico, Maghfiroh *et al.* (2018) reportaron una mayor floculación de *Chlorella* sp. a pH 11 con harina de semilla de moringa (0.05 g/L y 0.15 g/L). Este fenómeno a pH elevado (10-11) se atribuye a la autofloculación, explicada por Vandamme (2013).

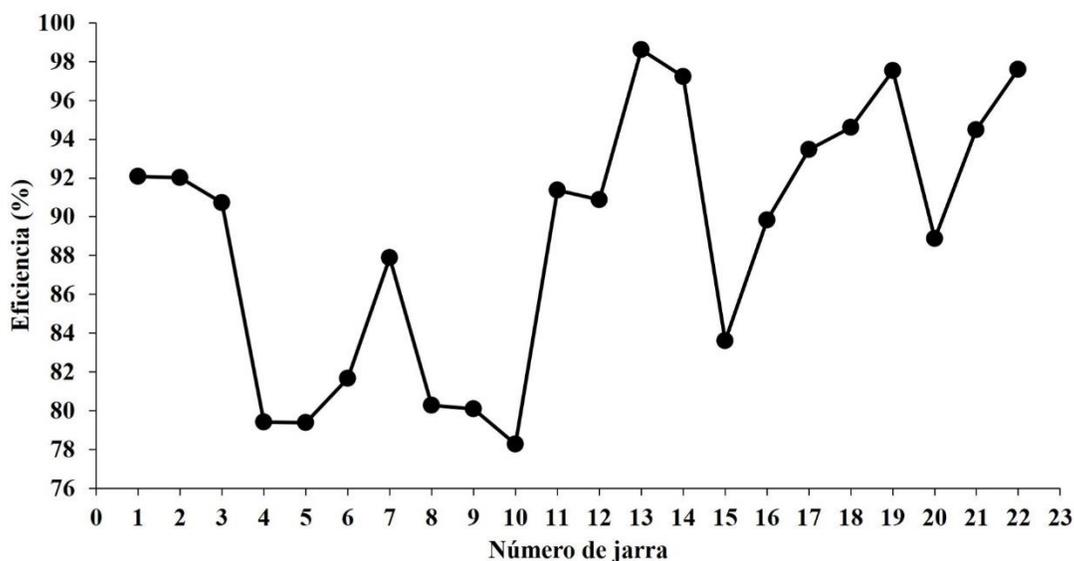


Figura 1. Eficiencia de separación de la biomasa del medio de cultivo en un pH de 9.0.

3.2 Altura de las plántulas

Durante el periodo experimental de 42 días, se realizaron cuatro mediciones (13 y 27 de abril, 11 y 25 de mayo) para

evaluar el efecto del bioestimulante de *Chlorella vulgaris* en lechugas romanas verdes. Los tratamientos incluyeron aplicación foliar, aplicación encapsulada media y dos controles (positivo con

fertilizante sintético Triple 15 y negativo sin fertilizante). Se evaluaron tres variables: altura, número de hojas y ancho de hoja, junto con observaciones visuales de color y rigidez foliar. Como se observa en la Tabla 7, el mayor crecimiento lo presentó el tratamiento con fertilizante químico, alcanzando 16.5 cm. Sorprendentemente, las plántulas del grupo de control (sin fertilizante) registraron el segundo mayor crecimiento, con 10 cm.

Por su parte, los tratamientos con bioestimulante foliar mostraron un crecimiento y alturas promedio variables: la concentración baja obtuvo el mejor resultado de este grupo, alcanzando una altura de 15 cm con un crecimiento de 8 cm; la concentración alta tuvo una altura promedio de 13.5 cm con un crecimiento de 7.5 cm; y la concentración media fue la más baja, con 6 cm de crecimiento. Finalmente, los tratamientos encapsulados presentaron un crecimiento promedio similar entre sí, de 5.5 cm.

Tabla 7. Crecimiento de las plántulas en los cuatro periodos de observación

Color	Método	Altura de plántulas (cm)				Crecimiento
		13 de abril	27 de abril	11 de mayo	25 de mayo	
Azul	Encapsulada	6.5	8.0	11.0	12.0	5.5
Morado	Encapsulada	7.5	9.0	11.5	13.0	5.5
Amarillo	Encapsulada	7.0	7.5	10.5	12.5	5.5
Verde oscuro	Foliar	6.0	7.0	11.0	13.5	7.5
Verde claro	Foliar	6.5	7.5	12.0	12.5	6.0
Aguamarina	Foliar	7.0	9.0	12.0	15.0	8.0
Naranja	Sin fertilizante	6.0	9.0	12.0	16.0	10.0
Rojo	Químico	6.0	10.0	16.0	22.5	16.5

3.3 Número de hojas

Durante las mediciones, se observó que la mayoría de las plántulas mantuvieron un número constante de 6 hojas, resultado de una renovación natural en las cuales se caían hojas viejas y nacían nuevas. Las excepciones a estas fueron: *Rojo*, ya que aumentó a 8 hojas desde la tercera medición, indicando un desarrollo foliar más activo; y *Verde claro*, que terminó con un promedio de 5 hojas, lo que sugiere un desarrollo más limitado.

3.4 Ancho de hojas

Aunque la mayoría de las hojas se mantuvieron delgadas durante todo el ensayo, se observaron algunas variaciones en el ancho promedio final por tratamiento. Con los datos obtenidos en la Tabla 8, se pudo observar que las plántulas tratadas con fertilizante químico, presenta el mayor crecimiento en ancho de las hojas, siguiendo con el patrón de los ítems anteriores, que es el fertilizante que mejor

se comporta con las lechugas. Las lechugas tratadas con bioestimulante foliar en concentraciones alta y baja mostraron hojas un poco más anchas que las del resto

de los tratamientos con bioestimulante. El grupo *Verde claro* (foliar media) presentó el menor ancho, lo cual coincide con su menor número de hojas y menor rigidez.

Tabla 8. Promedio de ancho de hojas por grupo de colores

Color	Ancho de hoja (cm)
Rojo	6.0
Verde oscuro	3.5
Aguamarina	3.5
Azul	3.0
Morado	3.0
Amarillo	3.0
Naranja	3.0
Verde claro	2.0

3.5 Color, textura y rigidez de hojas

Se realizó una evaluación cualitativa basada en el color, textura y rigidez visual de las hojas al final del experimento:

Rojo: Hojas verdes oscuras, anchas, rígidas y con un mayor grosor.

Verde oscuro: Hojas con buena rigidez, apenas más gruesas que las demás, color verde medio a oscuro.

Aguamarina: similar a Verde oscuro, con buena rigidez y color.

Azul: verde sólido, rigidez media.

Morado: verde sólido en algunas hojas, otras un poco más claras, rigidez media.

Amarillo: verde más pálido, menos rígida, hojas más delgadas, un poco quebradizas.

Verde claro: hojas delgadas, menos rígidas, algo quebradizas y de color más pálido.

Naranja: hojas largas, delgadas, algo quebradizas, verde estándar sin mucha rigidez.

Tomando en cuenta los estudios anteriores y los resultados, se pueden encontrar algunas causas por las cuales las plántulas no se lograron desarrollar de la mejor manera y no fue tan efectivo el bioestimulante.

3.6 Observación de las raíces

Al finalizar el experimento, se realizó una inspección visual de las raíces de todas las plántulas correspondientes a los distintos tratamientos, en el cual no se evidenció diferencias aparentes en cuanto a longitud, grosor, ramificación o color entre los grupos tratados con bioestimulante, fertilizante químico o sin fertilizante. Todas las lechugas presentaron raíces sanas, blancas y bien desarrolladas, lo que sugiere que ninguno de los tratamientos afectó negativamente a las plántulas durante el periodo de prueba.

3.7 Condiciones climáticas en Suba, Bogotá (abril-mayo 2025)

Las condiciones climáticas durante el periodo experimental en Bogotá pudieron haber influido significativamente en los resultados obtenidos, en especial considerando que el cultivo se realizó al aire libre. A continuación, se detallan los factores climáticos obtenidos de Weatherspark (2025):

Temperaturas: Durante abril y mayo, las temperaturas en Suba oscilaron entre mínimas de 10.3 °C y máximas de 16.7 °C, con una media de 12.9 °C.

Nubosidad: Se reportaron cielos en su mayoría nublados, con lluvias frecuentes, con mayor frecuencia en las tardes.

La escasa luminosidad registrada durante el periodo de prueba puede haber inducido una menor acumulación de materia seca, limitando el crecimiento de las plántulas incluso en tratamientos con un bioestimulante de microalga. Este déficit lumínico también puede explicar fenómenos como la etiolación, donde las plantas alargan de forma excesiva sus tallos y desarrollan hojas más delgadas y pálidas en busca de luz, así como una reducción de la síntesis de clorofila, afectando el color y vigor de la hoja, según estudios de Chen (2016) y PictureThis (2024).

En cuanto a los tratamientos encapsulados, se detectó la permanencia de las cápsulas de alginato al finalizar el experimento, lo que indica una posible liberación incompleta del bioestimulante, que podría relacionarse con las bajas temperaturas y la alta humedad del suelo, que disminuyen la velocidad de disolución del alginato y, por tanto, limitan la disponibilidad del bioactivo (Navarro y Gouveia, 2022).

3.8 Observaciones en el experimento

Durante el experimento, se observaron los siguientes efectos los cuales quizás estén relacionados con los factores climáticos:

Fertilizante Químico (Rojo): Aunque mostró el mayor crecimiento en altura y número de hojas, algunas plántulas presentaron quemaduras debido a una posible sobredosis, esto se puede dar por la alta humedad y baja radiación solar que podrían haber empeorado estos efectos, reduciendo la capacidad de las plantas para procesar los nutrientes aplicados.

Bioestimulante Encapsulado (Azul, Morado, Amarillo): Las cápsulas no se disolvieron completamente al final del experimento, posiblemente debido a las bajas temperaturas y la alta humedad, que pueden ralentizar la descomposición de las cápsulas y limitar la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

Bioestimulante Foliar (Verde Oscuro, Verde Claro, Aguamarina): Los tratamientos foliares mostraron un crecimiento moderado, con diferencias en la rigidez y color de las hojas, pero la eficacia de los bioestimulantes foliares puede verse afectada por la humedad y la temperatura, que influyen en la absorción de los compuestos aplicados.

El bioestimulante derivado de la microalga *Chlorella vulgaris* es una fuente significativa de compuestos bioactivos como fenoles, fitohormonas y ácidos grasos. No obstante, estos se encuentran encapsulados dentro de una compleja pared celular de celulosa y azúcares (Safi *et al.*, 2014). Por tanto, la falta de una ruptura efectiva de dicha pared, junto con otros factores como desafíos climáticos,

probablemente impidió la liberación de los compuestos activos esenciales para el crecimiento celular de las plántulas. Por lo tanto, se relaciona que la escasa liberación de estos compuestos bioactivos es una de las causas de los resultados desfavorables en el presente estudio.

La literatura especializada describe diversos procedimientos para la extracción de estos compuestos (Sánchez *et al.*, 2020). Por ejemplo, en el estudio de Barone *et al.* (2017), se lograron resultados favorables en el crecimiento y número de raíces de la remolacha al tratar la biomasa de *Chlorella vulgaris* con metanol para obtener extractos intracelulares. Suchithra *et al.* (2022) aplicaron la biomasa de la microalga de forma foliar y en el suelo tras una extracción con ultrasonido (20 kHz), obteniendo resultados positivos para el crecimiento de plantas de tomate. Estos ejemplos demuestran que una etapa de extracción adecuada es fundamental para aprovechar el potencial bioestimulante de *Chlorella vulgaris*.

4. Conclusiones

La separación del medio de cultivo mediante un proceso de floculación asistida con harina de semilla de moringa alcanzó una eficiencia de recuperación superior al 89%. La aplicación foliar demostró ser la mejor opción para estimular el crecimiento de las plántulas de lechuga romana, particularmente en las concentraciones baja y alta. Este método favoreció la absorción directa de compuestos bioactivos a través de las hojas, a diferencia de la aplicación encapsulada, cuya eficacia fue limitada por la lenta disolución de las cápsulas en condiciones ambientales de baja temperatura y alta humedad.

Por tanto, se valida la aplicación foliar como la estrategia más adecuada para el uso de bioestimulantes derivados de *Chlorella vulgaris* en este tipo de cultivo.

Aunque el fertilizante sintético (Triple 15) mostró mejor desempeño en términos de crecimiento y desarrollo foliar, el bioestimulante derivado de *Chlorella vulgaris* evidenció buenos resultados en aplicaciones foliares. Si bien no superó al fertilizante químico, su desempeño en condiciones no óptimas, junto con su carácter ecológico y bajo impacto ambiental, lo posiciona como una alternativa viable y con potencial para ser optimizada.

5. Recomendaciones

Se recomienda cuantificar la biomasa algal mediante el método de peso seco sin cenizas. Para la liberación de los compuestos bioactivos, se sugiere el método de extracción por ultrasonido con solventes acuosos u orgánicos. Las futuras investigaciones deben enfocarse en la validación de los resultados en ambientes controlados para minimizar la variabilidad climática y optimizar las condiciones de cultivo. Finalmente, para que la producción del bioestimulante sea más económica y escalable a gran escala, se recomienda investigar el cultivo de las microalgas en aguas residuales o con otros materiales de bajo costo.

Open Access: This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0) which permits any use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author(s) and the source are credited.

6. Referencias

- Almeida, P. M. E. 2020. Efecto del ácido indol 3-acético (aia) exógeno en presencia de luz azul y blanca en la productividad de biomasa de tres biotipos de *Chlorella* sp. en el alto andino ecuatoriano. Tesis de Maestría. Universidad de las Américas, Quito, Ecuador. UDLA-EC-TMACSA-2020-05.pdf
- Barone, V., Baglieri, A., Stevanato, P., Broccanello, C., Bertoldo, G., Bertaggia, M., Cagnin, M., Pizzeghello, D., Moliterni, V. M. C., Mandolino, G., Fornasier, F., Squartini, A., Nardi, S., Concheri, G. 2017. Root morphological and molecular responses induced by microalgae extracts in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *J Appl Phycol* 30(2):1061-1071. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1283-3>
- Bolaños, M., Victoria, D. 2019. Evaluación de la respuesta fisiológica de la microalga *Chlorella* sp. a la presencia de metal cromo (VI) en aguas sintéticas. Tesis de Grado. Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17413?locale=es>
- Campbell, C. R. 2009. Reference sufficiency ranges for plant analysis in the southern region of the United States. Southern Cooperative Series Bulletin #394. Disponible en: Reference sufficiency ranges for plant analysis in the southern region of the United States - North Carolina Digital Collections
- Campos, M., Saldaña, M. 2015. Metodología para extracción de aceite de la microalga *Nannochloropsis oculata* usando ultrasonido. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica* 16(32):34-37. <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/11345>
- Chen L. J. 2016. La influencia de la luz en Porteroel crecimiento del cultivo. Disponible en: <https://www.pthorticulture.com/es-us/centro-de-formacion/la-influencia-de-la-luz-en-el-crecimiento-del-cultivo>
- Corradini S. F. 2023. Referencias para análisis foliares: valores esperados para la prognosis de deficiencias nutricionales. Boletín INIA N°483. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA La Platina. Santiago, Chile. 172 p. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20500.13082/148240>
- Correndo, A. A., Garcia, F. 2012. Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico: Cultivos extensivos. *Informaciones Agronómicas*, 1-8. https://www.researchgate.net/publication/313856965_Concentracion_de_nutrientes_en_planta_como_herramienta_de_diagnostico
- Del Prete, F., Esposito, T., Pane, C., Manganiello, G., Pepe, G., Salviati, E., Campiglia, P., Mencherini, T., Sansone, F., Aquino, R.P. 2025. Extract from *Chlorella vulgaris*: Production, characterization, and effects on the germination, growth and metabolite profile of *Eruca sativa* microgreens. *Ind Crops Prod* 233:121490. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121490>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). 2025, Febrero. Boletín técnico: Exportaciones - Febrero 2025. <https://www.dane.gov.co/files/operacione>

[/exportaciones/bol-exportaciones-feb2025.pdf](#)

Diproagro S.A.S. 2021. Ficha técnica fertilizante NPK 15-15-15. <https://diproagro.com/wp-content/uploads/2021/06/ficha-tecnica-triple-15.pdf>

EOS Data Analytics. (2025). Enfermedades de las plantas: Clasificación, causas y soluciones. EOS. <https://eos.com/es/blog/enfermedades-de-las-plantas/>

Food and Agriculture Organization (FAO). 2019. The international Code of Conduct for the sustainable use and management of fertilizers. Rome. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. <https://doi.org/10.4060/CA5253EN>

Food and Agriculture Organization (FAO), 2002. Los fertilizantes y su uso. Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/d81ae4cf-54e9-421d-8bac-d36719b2eaf0/content>

Hernández C. S. 2011. Inmovilización de microorganismos en esferas de alginato como protección contra condiciones adversas en un tratamiento de agua residual. Tesis de Maestría. Centro De Investigación Biológicas Del Noroeste, S.C. <http://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1001/223>

Hernández H. R. E. 2022. Estudio comparativo de alternativas de fertilizantes para los cultivos de Colombia a partir de la aplicación de la biotecnología. Trabajo de grado. Fundación Universidad de América. Repositorio Institucional Lumieres. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8900>

Hernández-Martínez, R., García-Aguado, L. R., Rico-Ramírez, M. V., Peña-Caballero, V., Luna, B. E. G. 2022. Encapsulación en perlas de alginato de bacterias promotoras de crecimiento vegetal aisladas de áreas naturales protegidas. *Jóvenes en la ciencia*. 16, 1-9. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3606/3102>

Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). 2003. Resolución No. 00150 de 2003. Por la cual se adopta el Reglamento Técnico de Fertilizantes y Acondicionadores de Suelos para Colombia. 21 de enero de 2003. <https://www.ica.gov.co/getattachment/27356680-bbc6-4e12-b757-1b62ac5b9068/2003R150.aspx>

Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). 2023. Producción, importación y exportación de fertilizantes. <https://www.ica.gov.co/getdoc/840aa134-6cb1-4aa0-84a6-370a3c170660/produccion-importacion-y-exportacion-fertilizantes.aspx>

Jang, S., Kuk, I. 2021. Effects of Biostimulants on Primary and Secondary Substance Contents in Lettuce Plants. *Sustainability* 13(5):2441. <https://doi.org/10.3390/su13052441>

Lized, V. 2021. Estado actual del estudio de las microalgas como bioestimulantes y perspectivas de su uso en la agricultura sostenible. <https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/4791>

Maghfiroh, W., Erdawati, N., Saefurahman, G., Hidayatuloh, S., Kawaroe, M. 2018. Harvesting effectiveness of *Chlorella* sp. biomass using different flocculation treatments of

Moringa oleifera extract and pH conditions. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 209: 012014.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/209/1/012014>

Maldonado Venegas, T. A. 2023. Microalgas como fuente de bioestimulantes agrícolas: una revisión. Tesis de Grado. Universidad de Concepción, Chile.

<https://repositorio.udec.cl/server/api/core/bitstreams/dd438db9-63e4-449d-9412-a29dface61e0/content>

Mancuso, S., Azzarello, E., Mugnai, S., Briand, X. 2006. Marine bioactive substances (IPA extract) improve foliar iron uptake and water tolerance in potted *Vitis vinifera* plants. *Adv Hort Sci* 20(2):156-161.

<https://www.jstor.org/stable/42882475>

Martins, P., Duarte, L., Pereira, H., Reis, A., Carvalheiro, F. 2024. Evaluation of different fractionation methods for the simultaneous protein and carbohydrate extraction from microalgae. *Biomass Conv Bioref* 15:999-1011.

<https://doi.org/10.1007/s13399-024-05279-w>

Moheimani, R. N., Borowitzka, A. M., Isdepsky, A., Sing, F. S. 2012. Standard Methods for Measuring Growth of Algae and Their Composition. In: Borowitzka, A. M., Moheimani, R. N. (Eds). *Algae for Biofuels and Energy. Developments in Applied Phycology*, vol 5. Springer, Australia. 265–284.

https://doi.org/10.1007/978-94-007-5479-9_16

Navarro, Ll. J. M., Gouveia, L. 2022. Protocolo de Microalgas de la Red RENUWAL (I). Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el

Desarrollo. España. 102 p. Disponible en: <https://n9.cl/w5nkzj>

Nichols, H. W., Bold, H. C. 1965. *Trichosarcina polymorpha* Gen. et Sp. Nov. *J Phycol* 1(1):34-38.

<https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.1965.tb04552.x>

Nolberto B. N. L., Avila C. L. J. 2023. Producción orgánica de lechuga (*Lactuca sativa* L.) Var. Crespa, con fertirriego en la provincia de Acobamba – Huancavelica. Tesis (Ingeniero Agrónomo). Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Huancavelica, Perú. 154 p. <https://hdl.handle.net/20.500.14597/6441>

Ñaupari D. J. L., Rojas R. I. C. 2017. Remoción de nitrógeno total empleando la microalga *Chlamydomona reinhardtii* en el efluente de un camal avícola. Tesis Ingeniería Química Ambiental. Universidad Nacional del Centro del Perú, Perú.

<https://hdl.handle.net/20.500.12894/3780>

Oliveira, N. T., Nascimento, K. P., Gonçalves, B de O., Lima, F. C., Costa, A. L. N. 2018. Tratamiento de água com moringa oleífera como coagulante/floculante natural. *Revista Científica FAEMA* 9(1):373-382.

<https://doi.org/10.31072/rcf.v9i1.539>

PictureThis. 2024. ¿Cuánta luz solar necesita la lechuga romana? PictureThisAI. Disponible en: https://www.picturethisai.com/es/care/sunlight/Lactuca_sativa_var._ramosa.html

Rather, A. M., Jabeen, N., Bhat, T. A., Parray, E. A., Hajam, M. A., Wani, M. A., Bhat, I. A. 2018. Effect of organic manures and bio-fertilizers on growth and yield of lettuce. *The Pharma Innovation Journal*, 7(5):75-77. 7-4-108-590.pdf

Robledo, L. A. 2021. Estudio comparativo de la calidad de lechugas de distinta procedencia y evaluación de riesgos asociados con su ingesta. Tesis (Master), E.T.S.I. de Minas y Energía (UPM). https://oa.upm.es/68725/1/TFM_Alejandra_Robledo_Lopez.pdf

Safi, C., Zebib, B., Merah, O., Pontalier, P., Vaca-Garcia, C. 2014. Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 35:265-278. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.007>

Salim, B. B. M. 2016. Influence of biochar and seaweed extract applications on growth, yield and mineral composition of wheat (*Triticum aestivum* L.) under sandy soil conditions. *Ann Agric Sci* 61(2):257-265 <https://doi.org/10.1016/j.aosas.2016.06.001>

Sánchez, J., Loaña, J., Agualongo, M., Espinoza, K. 2020. Cultivation techniques and methods of extraction of fatty acids based on microalgae for the benefit of humanity. *Agroindustrial Science*, 10(3):319-328. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2020.03.15>

Suchithra, M. R., Muniswami, D. M., Sri, M. S., Usha, R., Rasheeq, A. A., Preethi B. A., & Dineshkumar, R. 2022. Effectiveness of green microalgae as biostimulants and biofertilizer through

foliar spray and soil drench method for tomato cultivation. *S Afr J Bot* 146: 740-750.

<https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.12.022>

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2024. World Population Prospects 2024: Summary of Results. Disponible en: https://population.un.org/wpp/assets/Files/WPP2024_Summary-of-Results.pdf

Valderrama, Z. L. N. 2017. Evaluación de harina de semilla de moringa como aceite floculante en la separación de biomasa microalgal *Chlorella vulgaris* de su medio de cultivo. Tesis de grado Ingeniería Química. Fundación Universidad de América. Bogotá, D.C. Colombia. 77 p. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/6599>

Vandamme, D. 2013. Flocculation based harvesting processes for microalgae biomass production. Dissertation for the degree of Doctor in Bioscience Engineering. Arenberg Doctoral School. <https://www.vliz.be/imisdocs/publications/254002.pdf>

Vanegas, J. A. G., Blair, G. H. G., Vergara, A. F. 2010. Manual de procesamiento y conservación de lechugas (*Lactuca sativa* L.) variedad verde y morada crespa mínimamente procesadas. Disponible en: <https://n9.cl/xwzya3>

Weatherspark (2025). Clima promedio en Bogotá, Colombia durante todo el año. Recuperado de: <https://n9.cl/ouzjk>