

# Evaluación de diferentes concentraciones de microalgas como potencial bioestimulante para la germinación de semillas de *Raphanus sativus*

Rafaela Basso Sartori<sup>1</sup> · Eduardo Jacob-Lopes<sup>2</sup>  
Richard Alberto Rodríguez Padrón<sup>1</sup> · Luis Guillermo Ramírez Mérida<sup>1</sup>



<sup>1</sup>Ingeniería en Agua y Desarrollo Sostenible, Universidad Tecnológica, Durazno, Uruguay; rafabasso.sartori@gmail.com, richard.rodriguez@utec.edu.uy, luis.ramirez@utec.edu.uy

<sup>2</sup>Departamento de Tecnologia e Ciência dos Alimentos, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil; ejacoblopes@gmail.com

## Resumen

El continuo crecimiento de la población mundial ha impuesto grandes desafíos sobre la agricultura. Como resultado, los agricultores han adoptado ampliamente el uso excesivo de fertilizantes y pesticidas sintéticos para satisfacer la creciente demanda de alimentos en todo el mundo. Aunque estos productos han ayudado a muchos países en desarrollo a aumentar el rendimiento de sus cultivos, estos han resultado simultáneamente en muchos problemas, principalmente la disminución de la fertilidad del suelo y degradación de los ecosistemas locales. Así, para que la agricultura sea más sostenible, el uso de alternativas productos biológicos, con reconocidos efectos beneficiosos sobre el rendimiento y en la salud de las plantas. En este contexto, las microalgas son fuentes ricas en nutrientes y metabolitos bioactivos, que han ido ganando protagonismo en su forma como propiedades bioestimulantes. Los bioestimulantes son

productos derivados de la materia orgánica que, cuando aplicados en pequeñas cantidades, son capaces de estimular el crecimiento y desarrollo de diversos cultivos y especies vegetales. En este sentido, este estudio evalúa diferentes concentraciones de *Spirulina platensis* y *Scenedesmus obliquus* como potencial bioestimulante para inducir la germinación de semillas de *Raphanus sativus*. Específicamente, el primer experimento se realizó para conocer los datos cinéticos de cada microorganismo y el segundo evaluó la germinación de semillas del cultivar *Raphanus sativus* en el que se utilizó la suspensión de estos microorganismos para mantener la humedad ideal para el desarrollo. Se realizarán tratamientos por igual tanto para *Spirulina platensis* como para *Scenedesmus obliquus*, donde los cultivos fueron diluidos en agua destilada en suspensiones que contienen (T5) 5%, (T10) 10%, (T15) 15% y (T25) 25% y tratamientos de control que contenían únicamente agua destilada (TC1) y otro que contenía

únicamente medio de cultivo (TC2). Por fin, se confirmó que *Spirulina platensis* y *Scenedesmus obliquus* actúan como bioestimulantes capaz de generar una buena tasa de germinación, contribuyendo a una mejor asimilación y estimulación del metabolismo del cultivar *Raphanus sativus*. Además, cuando comparamos las dos cepas, la microalga *Scenedesmus obliquus* obtuvo una mayor productividad celular (19,45 mg/L.h) y una mayor tasa de germinación 138,8% cuando se aplicó el tratamiento de suspensión al 15%.

## Palabras clave

Microalgas · Cianobacterias · Biomasa · Germinación · Sostenibilidad.

## Abstract

The continuous growth of the world population has imposed great challenges on agriculture. As a result, farmers have widely adopted the excessive use of synthetic fertilizers and pesticides to meet the growing demand for food around the world. Although these products have helped many developing countries increase their crop yields, they have simultaneously resulted in many problems, mainly the decline of soil fertility and degradation of local ecosystems. Thus, for agriculture to be more sustainable, the use of alternative biological products, with recognized beneficial effects on the performance and health of plants. In this context, microalgae are rich sources of nutrients and bioactive metabolites, which have been gaining prominence in their form as biostimulant properties. Biostimulants are

products derived from organic matter that, when applied in small quantities, are capable of stimulating the growth and development of various crops and plant species. In this sense, this study evaluates different concentrations of *Spirulina platensis* and *Scenedesmus obliquus* as a potential biostimulant to induce the germination of *Raphanus sativus* seeds. Specifically, the first experiment was carried out to know the kinetic data of each microorganism and the second evaluated the germination of seeds of the *Raphanus sativus* cultivar in which the suspension of these microorganisms was used to maintain the ideal humidity for development. Treatments will be carried out equally for both *Spirulina platensis* and *Scenedesmus obliquus*, where the cultures were diluted in distilled water in suspensions containing (T5) 5%, (T10) 10%, (T15) 15% and (T25) 25% and control treatments that contained only distilled water (TC1) and another that contained only culture medium (TC2). Finally, it was confirmed that *Spirulina platensis* and *Scenedesmus obliquus* act as biostimulants capable of generating a good germination rate, contributing to better assimilation and stimulation of the metabolism of the *Raphanus sativus* cultivar. Furthermore, when we compared the two strains, the microalgae *Scenedesmus obliquus* obtained higher cell productivity (19,45 mg/L.h) and a higher germination rate (138,8%) when the 15% suspension treatment was applied.

## Keywords

Microalgae · Cyanobacteria · Biomass · Germination · Sustainability.

## 1. Introducción

Las prácticas y perspectivas futuras de los agronegocios son de relevancia actual, pero enfrentan dos desafíos: mejorar la calidad y el rendimiento de los cultivos debido al crecimiento de la población mundial y minimizar los impactos en el medio ambiente y la salud humana. Recientemente, numerosas especies de microalgas han sido estudiadas por su efecto promotor en el crecimiento vegetal ligado a su uso como biofertilizantes y bioestimulantes, especialmente asociados a diversos compuestos bioactivos presentes en estos organismos, como polisacáridos, glucósidos, fitohormonas, poliaminas, lípidos y aminoácidos libres (Prisa y Spagnuolo, 2023).

Apesar del uso de estas alternativas biológicas es todavía relativamente bajo en comparación con el uso de productos sintéticos, representando no más del 5% del mercado mundial. Así, la creciente práctica de la agricultura orgánica, la necesidad de disminuir la materia orgánica del agua y del suelo, y una situación favorable al marco regulatorio son los principales factores que impulsan este mercado (Rhoden et al., 2022). Además, con la llegada de programas de manejo integrado de plagas y otras enfermedades que promueven el uso de productos orgánicos, se espera que el sector orgánico vea un aumento en el uso de procesos y productos basados en microalgas en un futuro muy cercano.

Las microalgas han surgido como un recurso potencial de biomasa sostenible debido a su neutralidad hacia el cultivo natural y los medios sintéticos. Estos microorganismos se han clasificado tradicio-

nalmente según los tipos de pigmentos, naturaleza química de los productos de reserva y estructura celular básica (Jacob-Lopes et al., 2019). En la taxonomía actual, los estándares incluyen 16 clases de estos organismos. Sin embargo, las cianobacterias (Cyanophyceae) y las algas verdes (Chlorophyta) son las más significativas en términos de exploración y uso biotecnológico (Borowitzka, 2018).

Las microalgas se pueden encontrar en casi todos los ambientes; encontrando un alto porcentaje en acuíferos (Riviers, 2006). *Spirulina platensis* pertenece a la familia de las cianobacterias (microalgas verdeazules), conocida también por su alto valor nutricional y considerada una de las fuentes naturales más completas de proteínas, vitaminas, minerales y otros nutrientes (Ramírez-Moreno y Olvera-Ramírez, 2006). Por su parte, especies como *Scenedesmus obliquus*, se caracteriza por tener altas tasas de crecimiento, ser robustas y producir una alta fuente de metabolitos de interés (Jacob-Lopes et al., 2019).

La horticultura implica la explotación de una gran cantidad de especies vegetales, más conocidas como hortalizas, y que incluye cultivos de hoja, raíces, bulbos, tubérculos y frutos diversos. Esta actividad ha sido señalada como una excelente alternativa de agronegocios capaz de incrementar la generación de alimentos en el mundo (Singh et al., 2023). Dentro de la horticultura, el cultivo del rábano tiene la ventaja de permitir ganancias debido a su gran demanda en el mercado de alimentos frescos, además de ser intolerante al trasplante, lo que puede plantarse de forma sencilla y directa. El rábano es una fuente de vitami-

na C, fósforo y fibra con muchos beneficios para la salud humana, tiene un ciclo muy corto (entre 20 y 40 días) y se puede cultivar prácticamente todo el año, obteniendo así un rápido retorno (Dantas, 2014). En este sentido, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el potencial de germinación de diferentes concentraciones de *Spirulina platensis* y *Scenedesmus obliquus* como producto bioestimulante en semillas de *Raphanus sativus*.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Microorganismos y medio de cultivo

Se propagaron cultivos axénicos de *Spirulina platensis* usando un medio de cultivo sintético con la siguiente composición (g/L): NaHCO<sub>3</sub> (3,2), NaCl (2,0), KNO<sub>3</sub> (0,8), KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (0,2), MgSO<sub>4</sub> (0,08) y Solucion de hierro (0,01). Ya la microalga verde *Scenedesmus obliquus* se mantuvieron en un medio de cultivo sintético contendo (g/L): K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (0,003), MgSO<sub>4</sub> (0,75), CaCl<sub>2</sub>·(0,76), amonio citrato de hierro (0,06), Na<sub>2</sub>EDTA (0,01), NaCl (0,08), NaNO<sub>3</sub> (0,15), ácido cítrico (0,06), Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (0,15), H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> (0,28), MnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O (0,18), ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O (0,02), Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O (0,04), CoSO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O (0,004). Las condiciones de mantenimiento fueron 25 °C y una intensidad de luz constante de 15 μmol.m<sup>-2</sup>/s.

### 2.2 Cultivo en biorreactor y datos cinéticos

Los cultivos se realizaron en un reactor tubular de vidrio de borosilicato, con volumen nominal de trabajo de 2,0 L,

ubicado en el laboratorio agroambiental de la Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC, ITR Centro-Sur, Durazno, UY. Las condiciones de cultivo fueron: concentración celular inicial de 100 mg/L, aireación constante de 1 VVM (volumen de aire por volumen de medio por minuto), una temperatura promedio de 24°C, pH entre 7-8, e iluminación constante de 5 Klux.

Los datos de concentración de biomasa se utilizaron para obtener la tasa de crecimiento específica máxima ( $\ln(X/X_0) = \mu_{max} \cdot t$ ), donde X es la concentración celular final (mg/L), X<sub>0</sub> es la concentración celular inicial (mg/L),  $\mu_{max}$  es la tasa de crecimiento específica máxima (h<sup>-1</sup>), y t es el tiempo de residencia (h). Para la productividad de la biomasa ( $PX = \mu \cdot X$ ), donde  $\mu$  es la tasa de crecimiento (h<sup>-1</sup>) y X es la concentración celular (mg/L). Los experimentos se realizaron por duplicado en el laboratorio agroambiental (UTEC, ITR Centro-Sur) y los datos cinéticos se refieren al promedio de cuatro repeticiones.

### 2.3 Condiciones y tratamientos experimentales

Se obtuvieron comercialmente semillas del cultivar *Raphanus sativus* y se realizaron los experimentos de germinación de semillas. Se prepararon cinco replicas en placas de Petri con 10 semillas en cada una de ellas, que contenían algodón como soporte. Cada una de ellas fue regada cada 24 h con los tratamientos respectivos.

Los tratamientos se realizaron por igual tanto para *Spirulina platensis* como para *Scenedesmus obliquus*, donde los cultivos de estos microorganismos se diluyeron

en agua destilada en suspensiones que contenían las siguientes concentraciones: (T5) 5%, (T10) 10%, (T15) 15% y (T25) 25%, resultando tratamientos equivalentes a concentraciones de 0,16 g/L, 0,32 g/L, 0,48 g/L y 0,80 g/L, respectivamente. Además, también se prepararon dos tratamientos de control que contenían únicamente agua destilada (TC1) y otro que contenía únicamente medio de cultivo respectivo a la microalga (TC2). Los experimentos se mantuvieron en una cámara de germinación (Tecnal, TE 402) con aireación continua, temperatura constante (25 °C) y fotoperiodo controlado de 12h:12h (luminosidad/oscuridad).

## 2.4 Análisis de desarrollo y crecimiento

El número de semillas germinadas de cada tratamiento se registró al final de las 96 horas para calcular el índice de germinación total (IG%) y la longitud promedio de la planta (cm), con el fin de evaluar las diferencias entre *Spirulina platensis* y *Scenedesmus obliquus* y comparar entre las diferentes concentraciones utilizadas y las pruebas de control para cada una. El índice de germinación se determinó según la siguiente fórmula:  $IG\% = 100 \times (Gt/Gc) \times (Pt/Pc)$  donde, Gt es el número de semillas germinadas del tratamiento; Gc es el número de semillas germinadas del control; Pt es la longitud promedio (cm) de las plantas del tratamiento y Pc es la longitud promedio (cm) de las plantas del control.

## 2.5 Análisis estadísticos

Se utilizó el software Statistica 10.0

(StatSoft, USA) para probar las diferencias entre tratamientos mediante análisis de varianza (ANOVA unidireccional) y la prueba de Tukey. Las tendencias se consideraron significativas sólo cuando las medias de los parámetros comparados son diferentes en  $p < 0,05$  de significancia.

## 3. Resultados y discusiones

El crecimiento de microorganismos como *Spirulina platensis* y *Scenedesmus obliquus* está controlado básicamente por una variedad de factores ambientales y para su cultivo son necesarias condiciones adecuadas de nutrientes, temperatura, potencial hidrogénico e iluminación. Por tanto, el conocimiento de los parámetros cinéticos de microalgas y cianobacterias se vuelve fundamental para evaluar sus mejores condiciones de crecimiento y productividad. Así, los resultados obtenidos de la cinética de crecimiento en nuestro estudio se resumen en la Tabla 1.

| Parámetros                          | <i>Spirulina platensis</i> | <i>Scenedesmus obliquus</i> |
|-------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| X <sub>máx</sub> (mg/L)             | 1900 <sup>a</sup>          | 1967 <sup>a</sup>           |
| P <sub>x</sub> (mg/L.h)             | 15 <sup>b</sup>            | 19,45 <sup>a</sup>          |
| μ <sub>máx</sub> (h <sup>-1</sup> ) | 0,0309 <sup>a</sup>        | 0,0368 <sup>a</sup>         |
| TG (h)                              | 22,4 <sup>a</sup>          | 18,8 <sup>b</sup>           |
| TRH (h)                             | 96 <sup>a</sup>            | 96 <sup>a</sup>             |
| R <sup>2</sup>                      | 0,756 <sup>b</sup>         | 0,933 <sup>a</sup>          |

X<sub>máx</sub>: concentración celular máxima, P<sub>x</sub>: productividad celular, μ<sub>máx</sub>: tasa de crecimiento específica, TG: tiempo de generación, TRH: tiempo de residencia hidráulica, R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación. Letras diferentes en la misma línea indican diferencias según prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ).

**Tabla 1** - Parámetros cinéticos obtenidos para *Spirulina platensis* y *Scenedesmus obliquus*

como se muestra en la Tabla 1, *Spirulina platensis* y *Scenedesmus obliquus* alcan-

zaron concentraciones máximas de crecimiento celular con nivel significativo similar entre las dos cepas, según prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ), con 1900 y 1967 mg/L en 96 h de cultivo. La tasa de crecimiento específico, tiempo de generación y productividad celular en biomasa para *Spirulina platensis* fue de 0,0309 h<sup>-1</sup>, 22,4 h y 15 mg/L.h, mientras que para *Scenedesmus obliquus* los resultados fueron 0,0368 h<sup>-1</sup>, 18,8 h y 19,45 mg/L.h, respectivamente.

La variación del rendimiento de biomasa (15 - 20 mg/L.h) para las dos cepas corrobora con los valores normalmente reportados en la literatura. Por ejemplo, para las cianobacterias, Singh y Kumar (2021) encontró una biomasa máxima de alrededor de 16 mg/L.h, mientras que Yadav et al. (2021) obtuvieron para *Spirulina platensis*, *Phormidium* sp. y *Oscillatoria* sp. un promedio entre 12-15 mg/L.h de biomasa seca, en 10 días de cultivo. La productividad de biomasa que obtuvimos para *Scenedesmus obliquus* fue casi 3 veces mayor que los valores obtenidos por Maroneze et al. (2016), y ligeramente superior al obtenido por De Morais et al. (2007) con rendimientos de biomasa de alrededor de 16 mg/L.h para *Scenedesmus obliquus*, en 12 días de crecimiento.

La productividad de la biomasa en nuestro estudio fue significativamente diferente ( $p < 0.05$ ) para *Scenedesmus obliquus*, que obtuvo 22% más en comparación con la productividad de *Spirulina platensis*. Una observación pertinente es observar los valores de los coeficientes de determinación obtenidos mediante modelos de regresión lineal simple entre las variables. En este caso, los coeficientes de determi-

nación para *Spirulina platensis* y *Scenedesmus obliquus* fueron  $R^2 = 0,756$  y  $R^2 = 0,933$ , respectivamente. Así, estos resultados mostraron que *Scenedesmus obliquus* explica más del 93% de la variabilidad, o sea, es la que mejor se ajusta a la muestra entre las variables estudiadas en este estudio, en este caso la correlación entre el crecimiento celular y la productividad de la biomasa en el tiempo de crecimiento obtenido para la microalga.

En cierto modo, estos resultados pueden estar asociados con el tipo de metabolismo relacionado con cada tipo de microorganismo, como se informó anteriormente. Además, según Gérin et al. (2020), la diferencia en el rendimiento de biomasa entre estos microorganismos puede estar asociada al medio de cultivo utilizado para su desarrollo. Como podemos observar, el medio de cultivo necesario para el desarrollo de *Spirulina platensis* tiene menos requerimientos de elementos en comparación con *Scenedesmus obliquus*. De hecho, la alta adaptabilidad de las diferentes cepas de *Spirulina* a ambientes extremos (ambientes alcalinos, salinos, alta temperatura, luz, entre otros) facilita la adaptación a medios de cultivo con bajos requerimientos de nutrientes, a lo que al final se suma el alto potencial de esta especie para la producción y comercialización de productos, debido a su bajo costo de mantenimiento (Costa et al., 2018).

Los cultivos comerciales de microalgas comenzaron en los años 1960 (*Chlorella*) seguidos de la *Spirulina* en los años 1970. En esta etapa, la proteína unicelular era el principal producto destinado a la industria, con aplicaciones dirigidas al uso

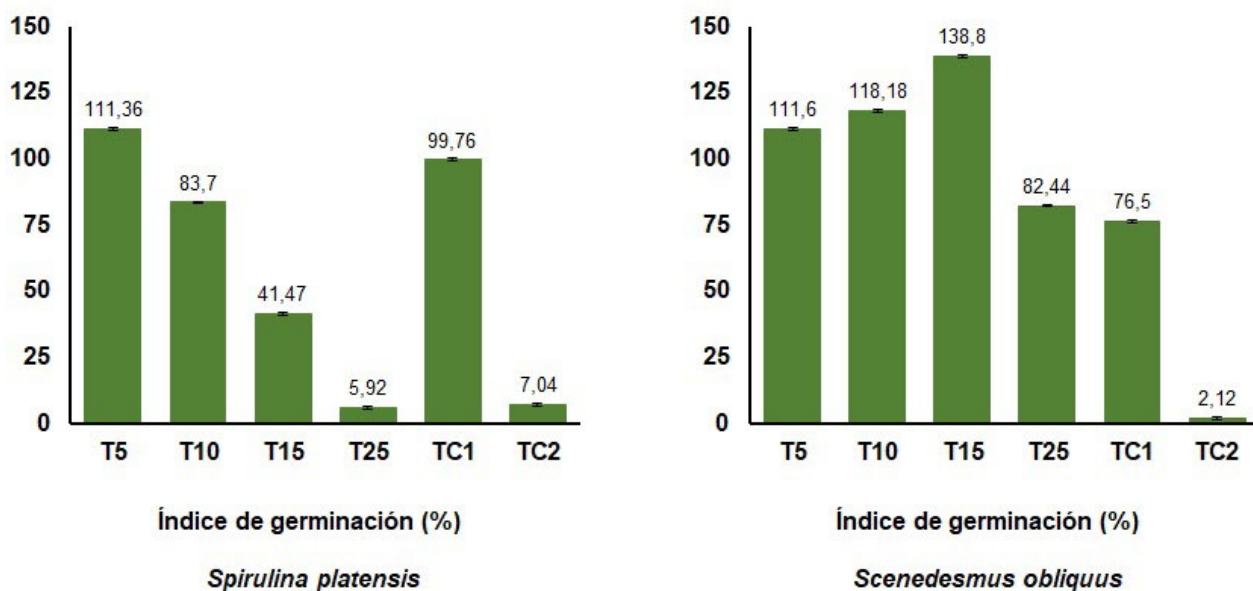
alimentario y profiláctico. Posteriormente surgió la producción de pigmentos y ácidos grasos poliinsaturados como aditivos alimentarios y comida para animales. Más recientemente, el uso de microalgas en la agricultura moderna ha despertado un gran interés debido a la amplia gama de beneficios que pueden aportar, tanto en el aumento de la productividad como en la salud de los cultivos, preservando al mismo tiempo el equilibrio ambiental (Jacob-Lopes et al., 2019).

Aunque se pueden utilizar varios productos para mejorar la productividad de los cultivos, la biomasa de microalgas tiene altos niveles de nutrientes que aportan efectos beneficiosos a las plantas. Es importante resaltar que diferentes compuestos biológicos pueden mejorar la productividad

agrícola a través de diferentes modos de acción y aplicabilidad (Gautam et al., 2021). En este sentido, la Figura 1 presenta los valores del índice de germinación encontrados en este estudio, con base en el uso de diferentes concentraciones de *Spirulina platensis* y *Scenedesmus obliquus* en la germinación de semillas de *Raphanus sativus*.

Los resultados de la prueba de germinación (Figura 1) demuestran que las microalgas han demostrado tener efectos positivos en la germinación de las semillas. En particular, el valor de *Scenedesmus obliquus*, especialmente para la concentración del 15%, fue el más alto (138,8%) y significativamente diferente en comparación con otros tratamientos y concentraciones ( $p < 0,05$ ).

Si observamos por separado según la prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ), los resulta-



**Figura 1** - Valores del índice de germinación (%) de *Raphanus sativus* en diferentes concentraciones de *Spirulina platensis* y *Scenedesmus obliquus*.

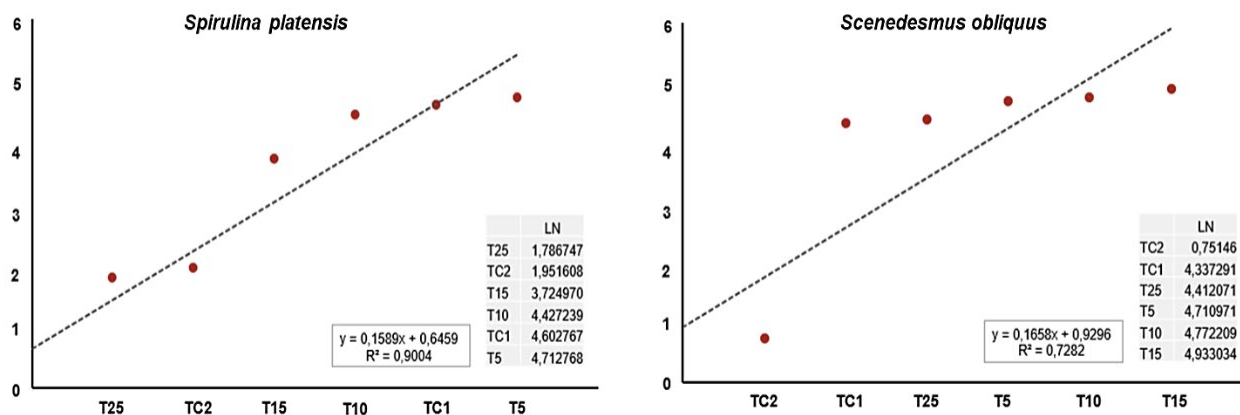
T5: 5%, T10: 10%, T15: 15%, T25: 25%, TC1: agua destilada, TC2: medio de cultivo. Letras diferentes en cada gráfico indican diferencias según prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ).

dos finales de la prueba de germinación de *Spirulina platensis* demuestran que el tratamiento (T5) obtuvo la mayor tasa de germinación (111,36%). En la Figura 1, se puede notar un comportamiento lineal entre tratamientos (T5 a T25), donde las tasas de germinación se reducen a medida que aumenta la concentración de uso de *Spirulina platensis*. Esto podría estar asociado a que los bioinsumos, derivados de microalgas, mejoran cuando se aplican en dosis bajas, lo que significa que tienen la capacidad de regular positivamente y mejorar los procesos fisiológicos y metabólicos de la planta (Cordeiro et al., 2022).

Siguiendo los análisis realizados, en la Figura 2, se presentan modelos de regresión lineal, ajustados entre datos del índice de germinación de *Raphanus sativus* en diferentes concentraciones de *Spirulina platensis* y *Scenedesmus obliquus*. Para estos modelos se obtuvieron los coeficientes de determinación  $R^2 = 0,9004$  para *Spirulina*

*platensis* y  $R^2 = 0,7282$  para *Scenedesmus obliquus*, teniendo en cuenta todas las concentraciones utilizadas, separadas por cada cepa de microalga. Así, los resultados indican que los modelos lograron explicar el 90% y el 73%, respectivamente, de la variabilidad encontrada en la productividad de *Raphanus sativus*. Además, al observar los datos de la Figura 2, es posible identificar una mayor disparidad entre las concentraciones y los medios utilizados para *Spirulina platensis*, mientras que la mayoría de las concentraciones y los medios utilizados para los datos de *Scenedesmus obliquus* rondaron un índice de linealidad entre 4,3 y 4,9, excepto cuando se utiliza sólo medio de cultivo (linealidad: 0,75).

Si comparamos el índice de germinación de *Scenedesmus obliquus*, podemos asociar su aumento debido a un mayor crecimiento celular y productividad de biomasa (Tabla 1), comprobando que existe interacción entre estos análisis, estadística-



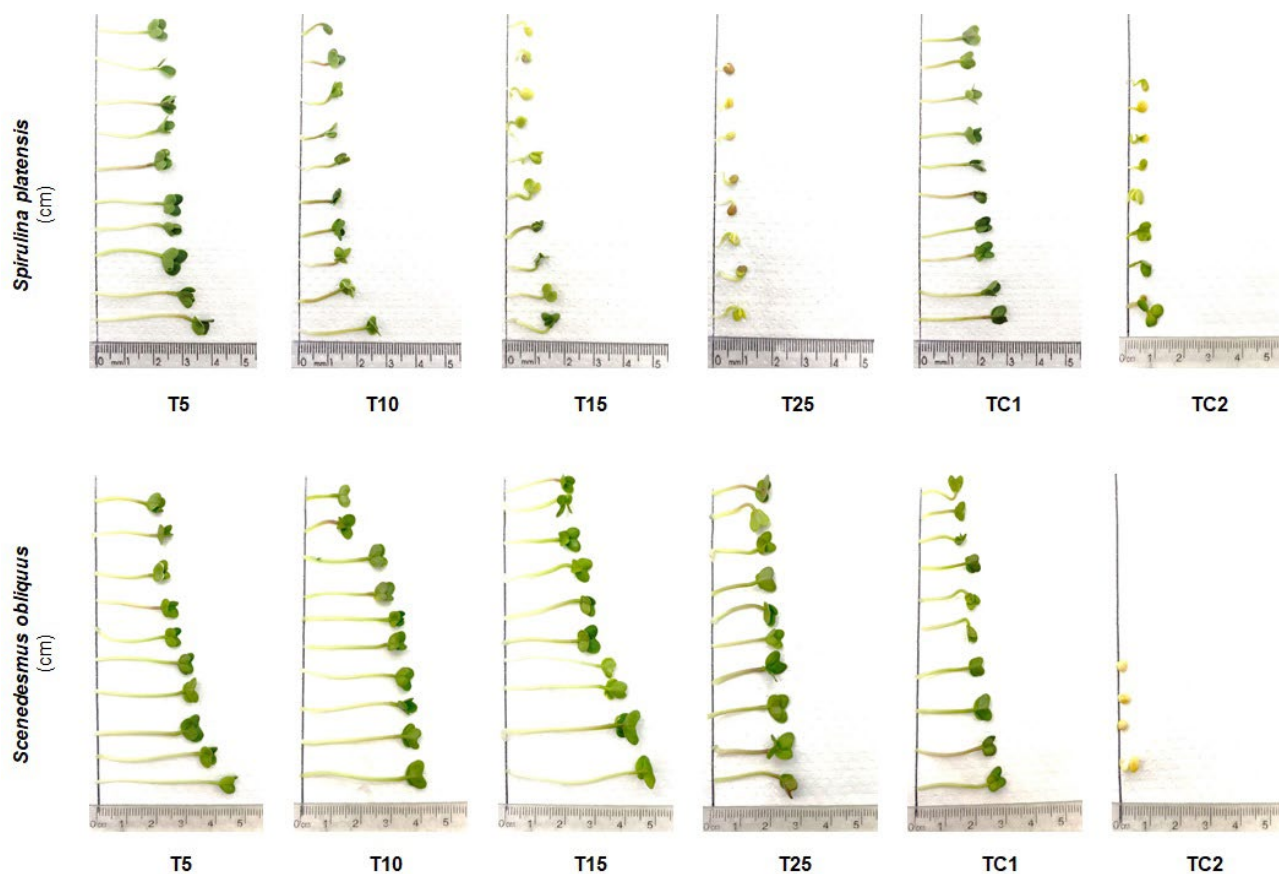
**Figura 2** - Regresión lineal de datos sobre el índice de germinación de *Raphanus sativus* en diferentes concentraciones de *Spirulina platensis* y *Scenedesmus obliquus*.

T5: 5%, T10: 10%, T15: 15%, T25: 25%, TC1: agua destilada, TC2: medio de cultivo. LN: linealidad.

mente. Sin embargo, este aumento solo se da cuando utilizamos una mayor concentración (10% y 15%) en la germinación de las semillas, lo que resultaría en más costos para el proceso, ya que existe una mayor demanda de biomasa. Cuando observamos los valores del 5% entre ambos microorganismos, la diferencia es prácticamente baja (0,24%). Además, los tratamientos al 25% fueron los más bajos en relación con las variaciones de concentración, tanto para *Spirulina platensis* como para *Scenedesmus*

*obliquus*. Estos resultados se pueden ver mejor en la Imagen 1, donde separamos los 10 crecimientos más altos de cada tratamiento para compararlos entre los dos microorganismos utilizados para la prueba de germinación.

Para los tratamientos de control, las tasas de *Spirulina platensis* fueron significativamente diferentes ( $p < 0,05$ ), con una tasa alta para TC1 (99,76%) en comparación con TC2 (7,04%). Estos resultados corroboran también los hallazgos de Sce-



**Imagen 1** - Crecimiento de la planta del cultivar *Raphanus sativus* (cm) a diferentes concentraciones de *Spirulina platensis* y *Scenedesmus obliquus*.

T5: 5%, T10: 10%, T15: 15%, T25: 25%, TC1: agua destilada, TC2: medio de cultivo.

*nedesmus obliquus*, donde TC1 (76,5%) y TC2 (2,12%) se encontraron en cantidades menores, en comparación con los cultivos que utilizaron microalgas. Sin embargo, el efecto de diferentes concentraciones de componentes utilizados en el medio de cultivo puede modificar el desarrollo inicial de las plantas. En este caso, la falta de nutrientes esenciales requeridos por *Raphanus sativus* provocó una menor tasa de germinación en los tratamientos control.

El aumento en el crecimiento de las plantas y la acumulación de biomasa debido a los diferentes tratamientos fue reportado previamente y relacionado con el aumento de clorofila y aminoácidos presentes en estos microorganismos (Lupatini, 2016). Varios estudios han demostrado que *Spirulina platensis* y *Scenedesmus obliquus* contienen aminoácidos esenciales en las proporciones recomendadas por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) (Campanella et al., 1999; Habib et al., 2008; Safi et al., 2013).

Cuando son absorbidos por las plantas, los aminoácidos y péptidos libres pueden incorporarse al metabolismo según demandas metabólicas específicas, como por ejemplo para la síntesis de clorofila, o para estimular procesos fisiológicos, actuando así, como moléculas de señalización (Cordeiro et al., 2022). También desempeñan un papel en el transporte de nutrientes dentro de la planta, particularmente nitrógeno. Además, están ampliamente involucrados en metabolismo primario y secundario, lo que lleva a la síntesis de varios compuestos que influ-

yen en la producción, el crecimiento y la tolerancia de la planta al estrés abiótico (Hilderandt et al., 2015).

En términos generales, los datos (Imagen 1) indican que los tratamientos estimularon el flujo de acciones metabólicas, justificando el aumento de las tasas de crecimiento y desarrollo del cultivar en tratamientos utilizados con diferentes concentraciones de cianobacterias y microalgas verdes. Por ejemplo, los promedios de crecimiento de *Spirulina platensis* fueron 2,94, 1,86, 1,43 y 0,74 cm para los tratamientos de 5, 10, 15 y 25%, respectivamente, en los cuales podemos identificar datos estadísticos proporcionalmente inversos, o sea, cuanto mayor la concentración de *Spirulina platensis*, menor fueran los rendimientos de *Raphanus sativus*. Sin embargo, para los tratamientos utilizados con *Scenedesmus obliquus*, el crecimiento promedio de las plantas en cm fue de 3,47 cm para el 15% y 2,29 cm para el 25%, mientras que los tratamientos de 5 y 10% obtuvieron el mismo crecimiento, según la prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ), alcanzando un promedio de 3,16 cm para cada tratamiento reportado. Así, con estos resultados, podemos afirmar que *Spirulina platensis* y *Scenedesmus obliquus* actúan como bioestimulante vegetal, contribuyendo a una mejor asimilación y estimulación del metabolismo del cultivar *Raphanus sativus*.

#### 4. Conclusión

Las microalgas han demostrado tener efectos positivos en la germinación y crecimiento de las semillas. Sin embargo,

existe una clara necesidad de invertir en investigaciones que consideren diferentes especies de microalgas como bioestimulantes, además de estudios que evalúen la cantidad y método de aplicación de sus extractos.

Teniendo esto en cuenta, nuestra investigación permitió identificar que el uso de *Spirulina platensis* y *Scenedesmus obliquus* promovió la mejor tasa de germinación de las semillas utilizadas y el desarrollo de las plantas del cultivar *Raphanus sativus*, en particular, concentraciones utilizadas entre 5% y 15% alcanzaron un promedio de crecimiento de 2,94 cm y 3,47 cm y una tasa de 111,36 % y 138,8% de germinación, respectivamente. Además, el crecimiento celular de estas cepas alcanzó más de 1900 mg/L, con énfasis en la productividad celular de *Scenedesmus obliquus* (19,45 mg/L.h) en comparación con la productividad celular de *Spirulina platensis* (15 mg/L.h).

La comercialización de un bioestimulantes actualmente no requiere de una demostración clara de su mecanismo de acción, sin embargo un mayor conocimiento de cómo las diferentes moléculas bioactivas afectan la fisiología vegetal permite acelerar la selección de nuevas cepas y planificar estrategias encaminadas a incrementar las concentraciones de compuestos bioactivos de interés en biomásas de microalgas, allanando el camino para una nueva categoría de bioestimulantes caracterizados por una mayor estandarización, fiabilidad y una mayor eficacia en cultivos.

Finalmente, estas informaciones ayudan a definir protocolos más precisos en las aplicaciones de microalgas e las prime-

ras etapas para la generación de plántulas siempre con el objetivo de utilizar compuestos que conserven mejor el medio ambiente. Además, el desafío de producir más alimentos con recursos limitados convierte a las microalgas en una alternativa adecuada para mejorar y proteger la producción vegetal y proporcionar beneficios económicos y ambientales en el mundo actual.

## 5. Agradecimientos

Al Departamento de Investigación y Desarrollo de la Universidad Tecnológica del Uruguay. Josué 1:9

### Objetivos de Desarrollo Sostenible vinculados al artículo



## Referencias

- Borowitzka, M. A. Biology of Microalgae. In: Microalgae in Health and Disease Prevention. Edited by Levine IA, Fleurence J. Academic Press, 23-72, 2018.
- Campanella, L.; Crescentini, G.; Avino, P. Chemical composition and nutritional evaluation of some natural and commercial food products based on *Spirulina*. *Analisis*, 27, 533–540, 1999.
- Cordeiro, E. C. N.; Mógor, Á. F.; de Oliveira Amatussi, J.; Mógor, G.; de Lara, G. B.; Marques, H. M. C. Microalga Biofertilizer Triggers Metabolic Changes Improving Onion Growth and Yield. *Horticulturae*, 8, 223, 2022.
- Costa, S. S.; Miranda, A. L.; Andrade, B. B.; De Moraes, M. G.; Costa, J. A. V.; Druzian, J. I. Influence of nitrogen on growth, biomass composition, production, and properties of polyhydroxyalkanoates (PHAs) by microalgae. *International Journal of Biological Macromolecules*, 116, 552–562, 2018.
- Dantas, G. J.; Silva, P. F.; Matos, R. M.; Borges, V. E.; Neto, J. D. Produção comercial de rabanete fertirrigado com nitrogênio em ambiente protegido. *Revista Educação Agrícola Superior*. 29, 97-102, 2014.
- De Moraes, M. G.; Costa, J. A. V. Biofixation of carbon dioxide by *Spirulina* sp. and *Scenedesmus obliquus* cultivated in a three-stage serial tubular photobioreactor. *Journal of Biotechnology*, 129, 439–445, 2007.
- Ferreira, A.; Bastos, C. R. V.; Santos, C. M.; Acien-Fernandez, F. G.; Gouveia, L. Algaeculture for agriculture: from past to future. *Frontiers in Agronomy*, 5, 1064041, 2023.
- Gautam, K.; Rajvanshi, M.; Chugh, N.; Dixit, R. B.; Kumar, G. R. K.; Dasgupta, S. Microalgal applications toward agricultural sustainability: Recent trends and future prospects. *Microalgae*, 339-379, 2021.
- Gérin, S.; Delhez, T.; Corato, A.; Remacle, C.; Franck, F. A novel culture medium for freshwater diatoms promotes efficient photoautotrophic batch production of biomass, fucoxanthin, and eicosapentaenoic acid. *Journal of Applied Phycology*, 32, 1581–1596, 2020.
- Habib, M. A. B.; Parvin, M.; Huntington, T. C.; Hasan, M. R. A review on culture, production and use of *Spirulina* as food for humans and feeds for domestic animals and fish. *FAO Fisheries and Aquaculture Circular*. No 1034, FAO, Rome, pp. 2–18, 2008.
- Hilderand, T. M.; Nesi, A. N.; Araújo, W. L.; Braun, H. P. Amino acid catabolism in plants. *Molecules in Plant*, 8, 1563–1579, 2015.
- Jacob-lobes, E.; Maroneze, M. M.; Depra, M. C.; Sartori, R. B.; Dias, R. R.; Zepka, L. Q. Bioactive food compounds from microalgae: An innovative framework on industrial biorefineries. *Current Opinion in Food Science*, 25, 1–7, 2019.
- Lupatini, A. L.; Colla, L. M.; Canan, C.; Colla, E. Eliane Colla. Potential application of microalga *Spirulina platensis* as a protein source. *Journal of the Science of food and agriculture*, 1, 2016.
- Maroneze, M. M.; Siqueira, S. F.; Vendruscolo, R. G.; Wagner, R.; De Menezes, C. R.; Zepka, L. Q.; Jacob-Lopes, E. The role of photoperiods on photobioreactors—a potential strategy to reduce costs. *Bioresource Technology*, 219, 493–499, 2016.

Prisa, D.; Spagnuolo, D. Plant Production with Microalgal Biostimulants. *Horticulturae*, 9, 829, 2023.

Ramírez-Moreno, L.; Olvera-Ramírez, R. Uso tradicional y actual de *Spirulina* sp. (*arthrospira* sp.). *Interciencia*, 31, 657-663, 2006.

Riviers, B. *Biología e Filogenia das Algas*. Porto Alegre, Ed. Artmed, p. 21-27; 66-94; 153-183, 2006.

Rhoden, M. A.; Viana, J. G. A.; Silveira, V. C. P. Change in land use and economic dynamics of the Ibirapuitã River Environmental Protection Area of the Brazilian Pampa biome. *Semina: Ciências Agrárias*. Londrina, 43, 2137-2154, 2022.

Safi, C.; Charton, M.; Pignolet, O.; Silvestre, F.; Vacca-Garci, C.; Pontalier, P. Y. Influence of microalgae cell wall characteristics on protein extractability and determination of nitrogen-to-protein conversion factors. *Journal of Applied Phycology*, 25, 523–529, 2013.

Singh, P.; Kumar, D. Biomass and Lipid Productivities of Cyanobacteria- *Leptolyngbya foveolarum* HNBGU001. *Bioenergy Research*, 14, 278–291, 2021.

Yadav, G.; Sekar, M.; Kim, S. H.; Geo, V. E.; Bhatia, S. K. Lipid content, biomass density, fatty acid as selection markers for evaluating the suitability of four fast growing cyanobacterial strains for bio-diesel production. *Bioresource Technology*, 325, 124654, 2021.

