

Artículo original

**Optimización de algunos parámetros operativos para la producción de Espirulina en un biorreactor *raceway pond***

**Optimization of Certain Operating Parameters for Spirulina Production in a Raceway Pond Bioreactor**

**PERCY FERMÍN VELÁSQUEZ CCOSI<sup>1</sup>**

 <https://orcid.org/0000-0001-7006-7583>

**JORGE ADALBERTO MÁLAGA JUÁREZ<sup>2</sup>**

 <https://orcid.org/0000-0002-9836-2282>

**LEIDY DIANA MEDINA QUIQUIN<sup>3</sup>**

 <https://orcid.org/0000-0002-9516-0116>

**MILTHON MORALES MIRANDA<sup>4</sup>**

 <https://orcid.org/0000-0002-4008-2739>

**JAIME OMAR MALLQUI PABLO<sup>5</sup>**

 <https://orcid.org/0009-0002-0688-5535>

Recibido: 15/07/2024

Aceptado: 18/08/2024

Publicado: 10/09/2024

<sup>1,2,3,4</sup>Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú

<sup>5</sup>Musuq Kawsay SAC, Huamanga, Ayacucho, Perú

E-mail: <sup>1</sup>percy.velasquez@unsch.edu.pe, <sup>2</sup>jorge.malaga@unsch.edu.pe, <sup>3</sup>leidy.medina@unsch.edu.pe, <sup>4</sup>milthon.morales@unh.edu.pe, <sup>5</sup>musuqkawsay2021@gmail.com



## Resumen

La producción de espirulina, un tipo de cianobacteria de alto valor nutricional y comercial, es de creciente interés en biotecnología y agricultura sostenible. Sin embargo, su eficiencia a gran escala enfrenta desafíos, especialmente en la optimización del rendimiento. Por ende, el objetivo del estudio fue evaluar el efecto de la velocidad de agitación (VA), tiempo de agitación (TA), y altura del agua (H) en tres niveles (bajo, medio y alto) para la optimización en la producción de espirulina en un biorreactor *raceway pond*. La metodología incluyó un diseño de cribado definitivo (DCD) con 13 tratamientos, donde se midieron los efectos de estas variables operativas sobre la concentración de espirulina en peso seco (g/L). El análisis estadístico reveló que el modelo cuadrático fue capaz de explicar satisfactoriamente ( $p=0,002$  y  $R^2 = 92,53 \%$ ). Aunque el análisis de varianza, mostró que solo los parámetros VA y H tuvieron un efecto significativo ( $p<0,05$ ). Luego, los valores optimizados y deseables indicaron que el tratamiento T13, con VA = 9,5 rpm, TA = 18 h y H = 0,23 m, presentó un rendimiento máximo de 1062,1 gramos de espirulina en peso seco por semana, equivalente a una concentración de  $0,352 \pm 0,02$  g/L. Estas condiciones, aplicadas en un entorno controlado de cultivo de microalgas, demostraron mejorar la productividad.

**Palabras clave:** biomasa; espirulina; optimización; biorreactor *raceway pond*.

## Abstract

The production of spirulina, a type of cyanobacteria with high nutritional and commercial value, is of growing interest in biotechnology and sustainable agriculture. However, its large-scale efficiency faces challenges, particularly in performance optimization. Therefore, the study aimed to evaluate the effect of agitation speed (AS), agitation time (AT), and water height (H) at three levels (low, medium, and high) for the optimization of spirulina production in a *raceway pond* bioreactor. The methodology included a definitive screening design (DSD) with 13 treatments, where the effects of these operational variables on the concentration of spirulina in dry weight (g/L) were measured. The statistical analysis revealed that the quadratic model could satisfactorily explain the results ( $p=0.002$  and  $R^2 = 92.53\%$ ). However, the analysis of variance showed that only the AS and H parameters had a significant effect ( $p<0.05$ ). Subsequently, the optimized and desirable values indicated that treatment T13, with AS = 9.5 rpm, AT = 18 h, and H = 0.23 m, achieved a maximum yield of 1062.1 grams of spirulina in dry weight per week, equivalent to a concentration of  $0.352 \pm 0.02$  g/L. These conditions, applied in a controlled microalgae cultivation environment, improved productivity.

**Keywords:** biomass; spirulina; optimization; *raceway pond* bioreactor.



## 1. Introducción

La espirulina (*Arthrospira platensis*), es un tipo de cianobacteria que ha ganado notoriedad a nivel global debido a sus excepcionales propiedades nutricionales y beneficios para la salud. Mientras que Ochoa y Moyano (2022), describen a la espirulina como un alga de color azul verdoso, colores atribuidos a la presencia de la clorofila y a la ficocianina; en la actualidad la espirulina, al contener un alto nivel de proteínas, es potencial su uso con fines médicos, nutricionales y alimenticios. Aunque su auge en la industria de alimentos y suplementos es relativamente reciente, el uso de espirulina como fuente alimenticia tiene raíces históricas. Los aztecas en México y las tribus Kanembu alrededor del Lago Chad en África la consumían como parte de su dieta habitual, debido a su alta concentración de proteínas, vitaminas, y minerales. (Al-Mahrouqi et al., 2024; Stunda-Zujeva y Berele, 2024). En la actualidad, la espirulina es considerada un superalimento y ha sido reconocida por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como uno de los mejores alimentos para el futuro debido a su valor nutricional y su facilidad de cultivo en diferentes condiciones ambientales (Asero, 2014; Sharoba, 2014).

Martínez-Palma et al. (2015) expresa que la espirulina es una microalga filamentosa que se ha utilizado como alimento desde tiempos antiguos, por su alto contenido de proteínas y la presencia de péptidos encriptados dentro de las secuencias de las proteínas originales, que son liberados en el proceso digestivo mostrando un efecto antioxidante. Por otra parte, es especialmente apreciada por su composición nutricional. Contiene entre 55 % y 70 % de proteína de alta calidad, incluyendo todos los aminoácidos esenciales que el cuerpo humano no puede sintetizar por sí mismo. Además, es una fuente rica de vitaminas del complejo B, vitamina E, provitamina A (en forma de betacaroteno), minerales como hierro, calcio, magnesio y potasio, y ácidos grasos esenciales, como el ácido gamma-linolénico (Infobae, 2024; Janda-Milczarek et al., 2023; Prates et al., 2020). La espirulina también es conocida por su alto contenido de antioxidantes, tales como ficocianina, clorofila y carotenoides, que ayudan a neutralizar los radicales libres en el cuerpo, reduciendo así el riesgo de enfermedades crónicas y fortaleciendo el sistema inmunológico (Stunda-Zujeva et al., 2023; Wang et al., 2023).

Su uso ha trascendido la industria alimentaria, encontrando aplicaciones en la industria cosmética, donde es valorada por sus propiedades hidratantes y antioxidantes, y en la industria farmacéutica, donde se investiga su potencial para tratar diversas enfermedades, incluyendo el cáncer, debido a sus propiedades antiinflamatorias y antitumorales (Fayyad et al., 2019; Wang et al., 2023). En la agricultura, se utiliza como suplemento para mejorar la salud de animales de granja y peces, promoviendo su crecimiento y resistencia a enfermedades (Rahman et al., 2023; Waheed et al., 2024). La producción intensiva de espirulina en el Perú ha experimentado un crecimiento progresivo, principalmente en estanques tipo canal, donde los productores se esfuerzan por regular factores como la iluminación, temperatura y agitación para lograr una producción adecuada. Sin embargo, aún existen ciertas deficiencias en el control de estos, provocando un lento desarrollo en el crecimiento del cultivo como consecuencia genera un bajo rendimiento de producción (Zabala, 2020).

A pesar de los numerosos beneficios, la producción comercial de espirulina enfrenta desafíos significativos, especialmente en lo que respecta a la optimización de los parámetros de cultivo para maximizar el rendimiento y la calidad del producto. El cultivo en *raceway ponds* o estanques de canal abierto es una de las técnicas más utilizadas. Estos biorreactores se caracterizan por su diseño simple y bajo costo de operación, lo que los hace adecuados para la

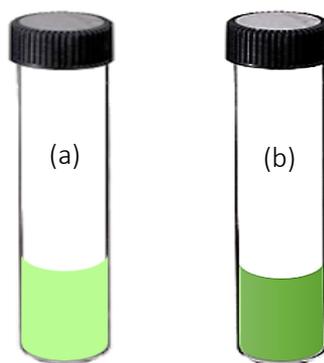
producción a gran escala. El cultivo en *raceway ponds* implica la circulación continua del medio de cultivo mediante paletas o ruedas de paletas, lo que asegura una mezcla adecuada y la exposición uniforme de las células de espirulina a la luz solar y a los nutrientes disponibles (Barboza-Rodríguez et al., 2024; Berden Zrimec et al., 2024; Ragaza et al., 2020). Sin embargo, la eficiencia de estos sistemas depende de la adecuada gestión de varios parámetros operativos, como la velocidad de agitación, el tiempo de agitación y la profundidad del estanque. Además de la intensidad de la luz, la temperatura y el pH. Cada uno de estos factores influye en la exposición de las células de espirulina a la luz solar, en la distribución de nutrientes y en la temperatura del medio, afectando tanto el crecimiento como la morfología de los tricomas. Por ende, el objetivo del estudio fue evaluar el efecto de algunos parámetros operativos para la optimización en la producción de Espirulina en un biorreactor *raceway pond*.

## 2. Metodología

### 2.1. Obtención de la muestra

Se utilizó la cepa de espirulina *Arthrospira platensis* suministrada por la empresa Musuq Kawsay. Los tricomas de la espirulina, que son estructuras celulares en forma de filamentos, constituyen la microalga y desempeñan funciones vitales como la fotosíntesis, la absorción de nutrientes y la eliminación de desechos (Oscanoa et al., 2020). Las muestras de espirulina se extrajeron mediante un método de muestreo aleatorio simple y posteriormente se cultivaron en tubos de ensayo bajo condiciones controladas: temperatura constante de 30 °C e iluminación de 5000 lux durante un periodo de 3 días. Este procedimiento se prolongó hasta alcanzar una concentración óptima, identificada por una tonalidad verde oscuro. Una vez alcanzada esta concentración (Figura 1), se procedió al escalamiento del cultivo de acuerdo a lo propuesto por Escriba (2021).

**Figura 1**  
*Muestra del cultivo de espirulina*



*Nota.* (a) Muestra inicial del cultivo de espirulina (b) Muestra concentrada del cultivo de espirulina para el escalamiento.

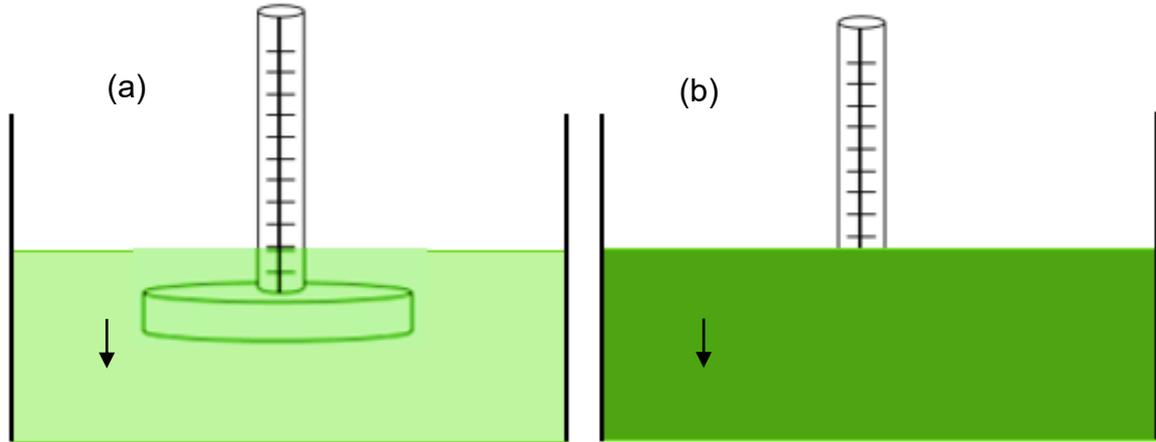
### 2.2. Escalamiento del cultivo

Tras alcanzar la concentración óptima en los tubos de ensayo, se realizó el escalamiento inicial en matraces de 250 mL hasta obtener la concentración deseada. El proceso continuó con una serie de escalamientos sucesivos en recipientes de 3 L, luego 20 L, 100 L y finalmente 200 L.



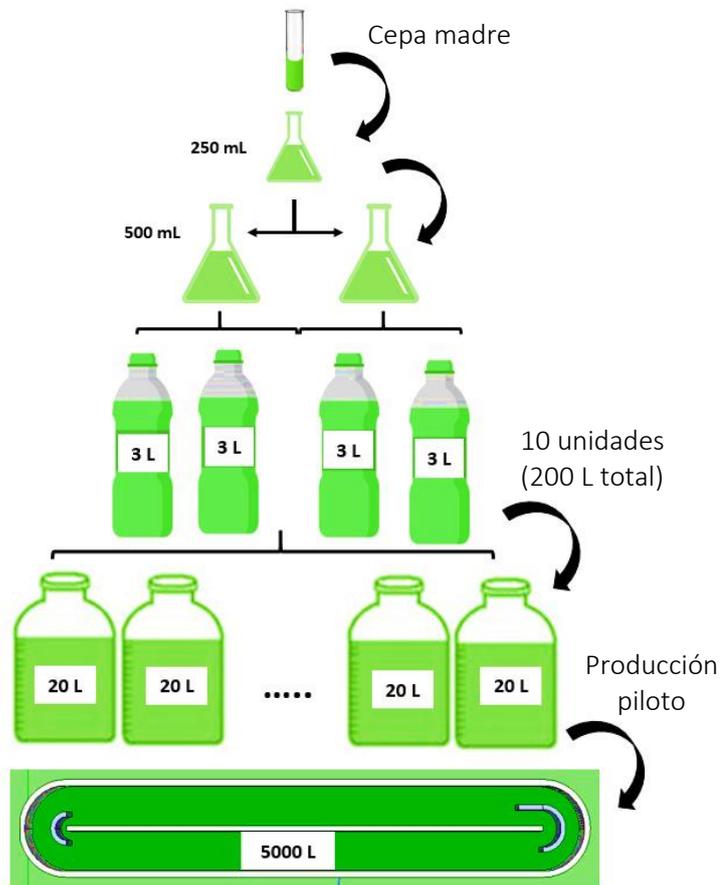
Durante el escalamiento, se utilizó un disco Secchi para medir la concentración adecuada del cultivo. Una vez que el disco Secchi dejó de ser visible a una distancia de 2 a 3 cm, se determinó que la espirulina había alcanzado una concentración suficiente para ser transferida a escala o para la cosecha, así como se muestra en la Figura 2 y 3.

Figura 2  
Medida de concentración en el cultivo de espirulina



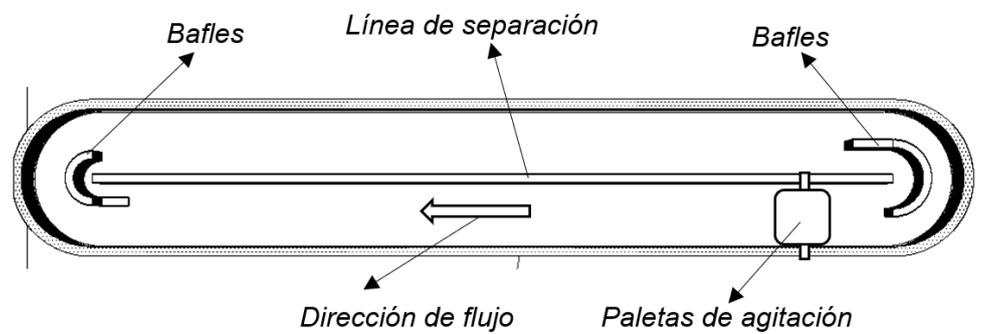
Nota. (a) Etapa inicial del cultivo de espirulina. (b) Cultivo con una concentración adecuada

Figura 3  
Escalamiento del cultivo de espirulina



Una vez lograda la concentración deseada, se inició la fase de crecimiento del cultivo en un estanque tipo canal, donde se manipularon las variables de estudio. El estanque tenía una capacidad de 5000 L, estaba construido con ladrillo y concreto, tenía forma rectangular con extremos semicirculares y una división central que permitía una circulación constante de biomasa. Además, el estanque contaba con deflectores o baffles en los extremos para evitar la formación de zonas muertas que pudieran afectar negativamente el cultivo (Figura 4). Se utilizó geomembrana de HDPE de calibre N°1 como revestimiento, y las paletas de agitación estaban acopladas a un motorreductor trifásico de 2HP. Según Dodd, estas paletas eran fundamentales para proporcionar una mezcla adecuada y oxigenar el cultivo dentro del estanque (Chisti, 2013).

**Figura 4**  
*Medida de concentración en el cultivo de espirulina*



### 2.3. Obtención de la concentración de espirulina

Para obtener la concentración del cultivo de espirulina en peso seco (g/L), se llevaron a cabo una serie de etapas metodológicas señaladas en la Figura 5. En primer lugar, se preparó el equipo de cosecha utilizando telas filtrantes de 50 micras, diseñadas para retener la biomasa de espirulina, y filtros agrícolas que permitieron eliminar cualquier impureza presente. Posteriormente, se procedió a la extracción de 1000 litros del estanque de cultivo mediante una bomba de agua sumergible de 0,67 HP.

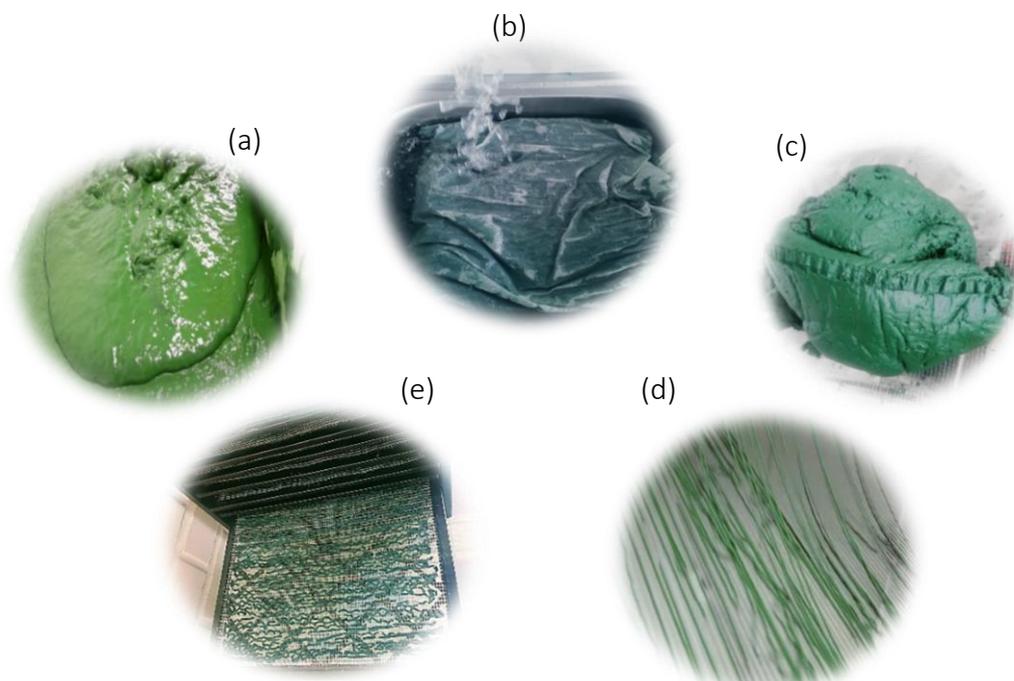
La siguiente fase consistió en el filtrado, que se realizó por gravedad para separar el agua de la biomasa cosechada. Una vez completado, se llevó a cabo el lavado de la biomasa, con el objetivo de eliminar cualquier rastro de sales y nutrientes residuales. Después, la biomasa fue sometida a un proceso de prensado manual, el cual permitió eliminar el exceso de líquido. Este paso resultó en una biomasa con una consistencia sólida tipo "torta", ideal para la fase de extrusión posterior.

En la etapa de extrusión, la "torta" obtenida se introdujo en un extrusor, el cual transformó la biomasa en filamentos similares a espaguetis. Esta configuración permitió un secado más uniforme y rápido. Finalmente, el secado se realizó en secadores de bandeja, manteniendo una temperatura constante de 40 °C durante un periodo de 7 horas. Este proceso aseguró que la espirulina alcanzara la concentración deseada en peso seco. Una vez que la espirulina se secó, se midió la concentración de la biomasa en términos de peso seco (gramos por litro, g/L). Esta medición se realizó pesando una muestra representativa de la espirulina seca y comparándola con el volumen inicial de cultivo.



Figura 5

Etapas para la obtención de concentración del cultivo de espirulina



Nota. (a) Cosecha (b) Filtrado y lavado (c) Prensado (d) Extrusión (e) Secado

## 2.4. Evaluación de la calidad morfológica de los tricomas

Para evaluar la calidad morfológica, se utilizó la cámara de conteo Sedgewick Rafter, la cual permitió realizar un conteo de tricomas lineales y espirales tanto en la etapa de adaptación inicial como en la fase de crecimiento exponencial final de los cultivos. El protocolo seguido incluyó la toma de una muestra de 1 mL de las pruebas experimentales, la observación de la muestra en la cámara Sedgewick Rafter usando un microscopio binocular a una magnificación de 100X, y la realización de un conteo representativo de 4 filas y 4 columnas para obtener un promedio. El índice de tricomas espirales y lineales se calculó utilizando la ecuación 1:

$$\text{Índice de tricomas} = \frac{N^{\circ} \text{ de tricomas espirales}}{N^{\circ} \text{ de tricomas lineales}} \quad (1)$$

## 2.5. Diseño experimental

Se empleó un diseño de cribado definitivo (DCD). Este enfoque de diseño experimental fue seleccionado por su capacidad para identificar y evaluar de manera eficiente los efectos de las variables y sus interacciones en el rendimiento del cultivo. El DCD permitió la formulación de trece (13) tratamientos distintos, los cuales fueron aplicados para explorar el espacio experimental y determinar las condiciones óptimas para la producción de espirulina. Los parámetros evaluados fueron la velocidad de agitación (VA), tiempo de agitación (TA) y altura de agua del estanque (H). Cada una de estas variables se exploró a tres niveles distintos: alto, medio y bajo, basándose en antecedentes y estudios previos que sugieren su influencia en el rendimiento de la producción de espirulina. (VA: 7; 9,5; 12), (TA:12; 18; 24) y (H: 0,15; 0,23;

30). Así mismo se realizó el análisis de varianza para determinar cuál de los tratamientos fueron más significativos.

### 3. Resultados

La tabla 1 muestra una variación en el rango de 0,213 a 0,352 g/L de rendimiento de la producción de espirulina. Entre los tratamientos, el T13 presentó mayor rendimiento ( $0,352 \pm 0,02$  g/L) al estar compuesto por las siguientes condiciones: Velocidad de agitación (VA) = 9,5 rpm, Tiempo de agitación (TA) = 18 h y la altura de agua del estanque (H) = 0,23 m, seguido del T6, T1 y T5 con un rendimiento de 0,300, 0,297 y 0,296 g/L respectivamente. El rendimiento fue calculado de acuerdo a la producción batch (1 semana), donde 1 056 g correspondió a un volumen total de 3 000 L, que equivale a una concentración de 0,352 g/L. La composición de estos tratamientos evidenció que en general los niveles intermedios de VA, TA y H generan mayor rendimiento, es decir que la interacción de las condiciones es positiva para el rendimiento, mientras que niveles bajos las condiciones (VA, TA y H) generan un rendimiento bajo, por ejemplo, los tratamientos T9 y T11, tuvieron un rendimiento de 0,213 y 0,224 g/L, posiblemente causada por el stress del cultivo al exponerse a mayor iluminación y alta temperatura y por ende conlleva a la mortalidad de la espirulina.

**Tabla 1**

*Diseño experimental del estudio concentración en seco del rendimiento*

Tratamiento	Velocidad de agitación (rpm)	Tiempo de agitación (h)	Altura de agua del estanque (m)	Rendimiento (g/3 000 L)	
	VA	TA	H	R	R
T1	9,5	24	0,30	892	0,297
T2	9,5	12	0,15	875	0,292
T3	12	18	0,30	696	0,232
T4	7	18	0,15	703	0,234
T5	12	24	0,23	888	0,296
T6	7	12	0,23	899	0,300
T7	12	12	0,30	675	0,225
T8	7	24	0,15	755	0,252
T9	12	12	0,15	640	0,213
T10	7	24	0,30	773	0,258
T11	12	24	0,15	672	0,224
T12	7	12	0,30	689	0,230
T13	9,5	18	0,23	1056	0,352

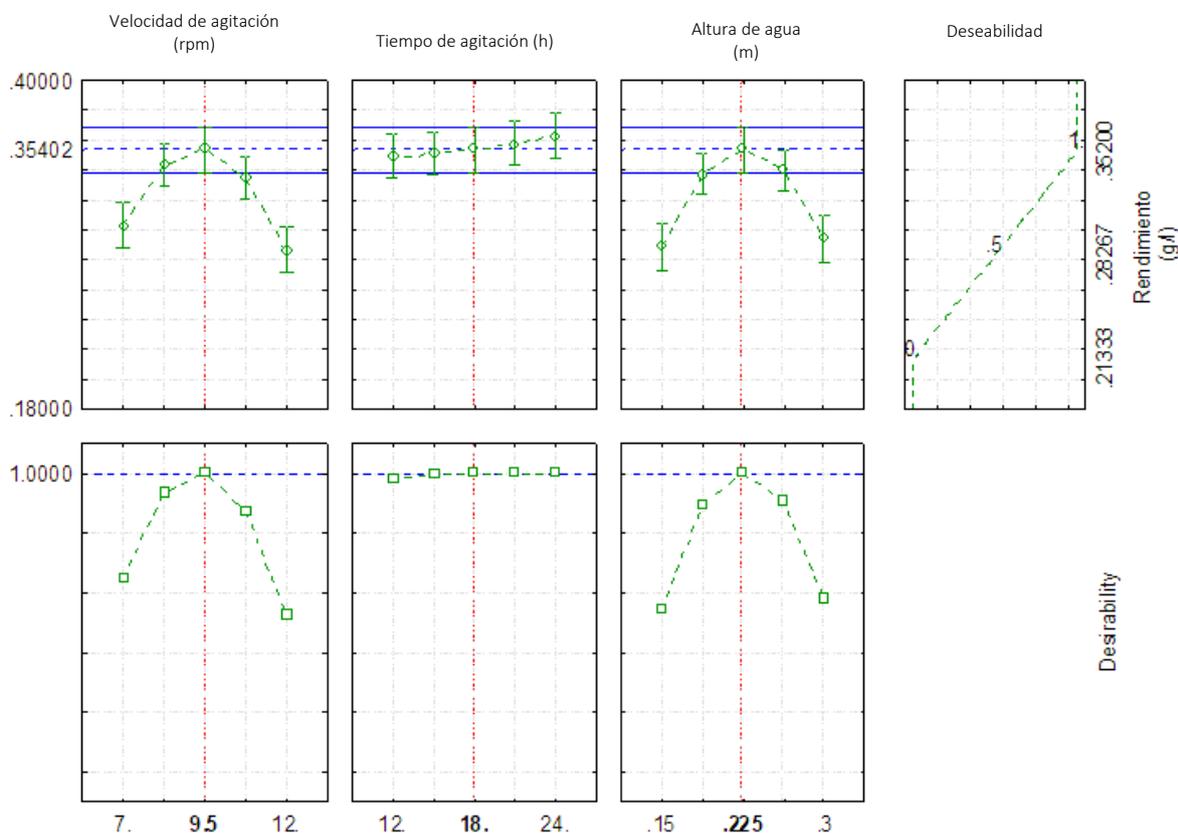
El análisis de varianza indicó que tanto H como la VA tienen un impacto significativo ( $p < 0,05$ ), mientras que el TA no presentó un efecto significativo ( $p > 0,05$ ). Luego, se evaluó los perfiles de los valores predichos y deseabilidad del rendimiento mediante el modelo cuadrático predictivo de la ecuación 1.

$$\begin{aligned}
 \text{Rendimiento} = & -0,973 + 0,1693 \text{ VA} - 0,00402 \text{ TA} + 4,966 \text{ H} - 0,009187 \text{ VA} * \text{VA} \\
 & + 0,000148 \text{ TA} * \text{TA} - 11,57 \text{ H} * \text{H} - 0,000139 \text{ VA} * \text{TA} + 0,0196 \text{ VA} * \text{H} \\
 & + 0,00500 \text{ TA} * \text{H}
 \end{aligned} \quad (1)$$



La Figura 7 muestra las diferentes configuraciones experimentales que afectan a las respuestas pronosticadas para un modelo predictivo, los factores de estudio explican un 92,53 % al rendimiento de espirulina (g/L). Así mismo, Las líneas entrecortadas rojas verticales en la figura representan la configuración óptima de los factores VA = 9,5 rpm, TA = 18 h y H = 0,225 m. Las líneas azules horizontales y los números representan las respuestas para el valor óptimo de los factores 1062,1 g de espirulina en peso seco por semana, equivalentes a 0,35 g/L de concentración de espirulina cuando los factores están en sus valores más altos (VA = 9,5 rpm, TA = 18 h y H = 0,225 m). Jourdan (2016) indica que a condiciones adecuadas la equivalencia es de 0,28 - 0,45 gramos de espirulina seca por litro, también menciona que estos datos varían en función a la variedad. Mientras Escriba (2018) menciona que la concentración de biomasa está en un rango de 0,32 – 0, 60 g/L.

**Figura 7**  
Perfil de valores de predicción y deseabilidad

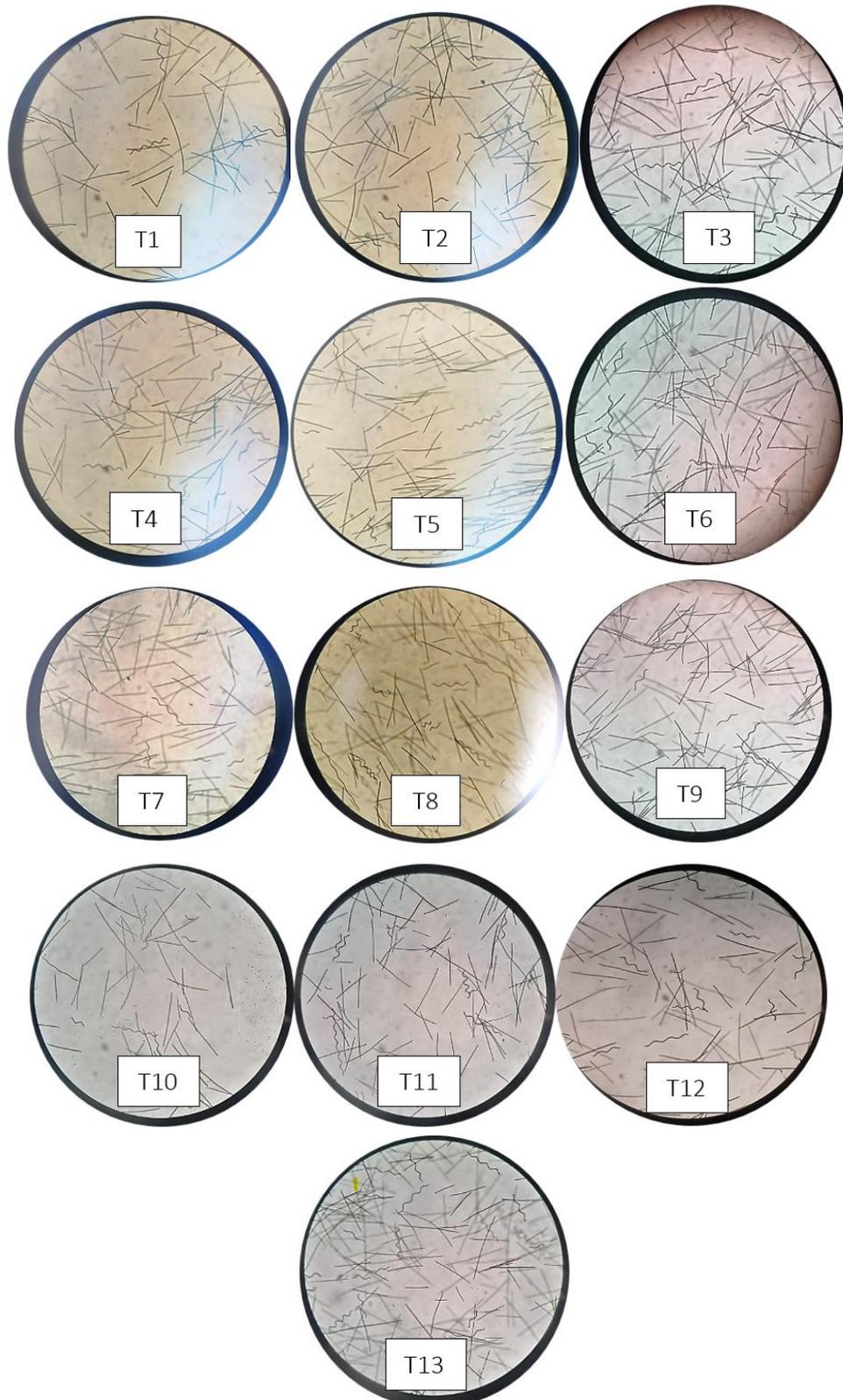


Por otro lado, la Figura 8 revela cómo las diferentes condiciones de manejo en el estanque, afectan directamente la morfología de los tricomas de espirulina. Las variaciones en la densidad, alineación, curvatura, y longitud de los tricomas observadas a través de los diferentes tratamientos indican que estos parámetros influyen significativamente en la estructura de la biomasa de espirulina producida. La morfología de los tricomas de espirulina varía según el tratamiento. En T1, los tricomas son largos y dispersos, mientras que en T2 y T3 son más cortos y agrupados, posiblemente debido a las condiciones de agitación y profundidad del medio. En T4 a T6, los tricomas muestran formas más enredadas: T4 es denso, T5 es más recto y T6 tiene una mezcla de formas. En T7 a T9, los tricomas son menos agrupados y presentan variabilidad en la longitud, sugiriendo ajustes a las condiciones de cultivo.

Finalmente, en T10 a T13, T10 y T11 muestran tricomas lineales y dispersos, T12 indica una mayor compactación, y T13 presenta una distribución uniforme con variaciones en longitud.

**Figura 8**

*Etapas para la obtención de concentración del cultivo de espirulina*





## 4. Discusión

Evaluar la VA es fundamental para obtener rendimientos adecuadas de espirulina. Donde una velocidad de 9,5 rpm proporcionó mejores rendimientos comparado con 7 y 12 rpm. Así como una agitación adecuada aumenta la productividad, mientras que una agitación demasiado baja provoca sedimentación y distribución inadecuada de nutrientes. En contraste, una agitación demasiado alta puede causar daños en la morfología de los tricomas de espirulina, afectando negativamente la concentración. Por lo tanto, mantener una velocidad de agitación equilibrada es esencial para evitar daños y optimizar el crecimiento de la espirulina (Sandoval-Simbaña, 2017).

El TA indica que las diferencias en concentración de espirulina entre 12 y 24 h de agitación son mínimas, con una ligera ventaja para el tiempo más largo. Sin embargo, se recomienda evitar la agitación durante la noche o en condiciones frías, por debajo de 15 °C, ya que la espirulina es un organismo fotosintético que necesita luz para generar energía química durante el día. Por lo tanto, agitar durante 12 horas diurnas no solo se adapta mejor a las necesidades del microorganismo, sino que también es más eficiente energéticamente, evitando el gasto innecesario de energía durante la noche. Para que el TA sea significativo, es importante mantener una iluminación constante durante 24 horas. Además, la iluminación nocturna con sistemas LED podría ser una alternativa para optimizar la producción de biomasa (Zhu y Wakisaka, 2020).

Con una agitación de 24 horas a 9,5 rpm, se obtuvo el mayor porcentaje de tricomas espirales, alcanzando un 30 %. Sin embargo, las velocidades de 7 y 12 RPM resultaron en porcentajes menores (18 % a 20 %). Estos datos son consistentes con los obtenidos a 12 horas, indicando que el tiempo de agitación no afecta significativamente la morfología. La transformación de tricomas espirales a lineales, irreversible una vez ocurrida, puede deberse a factores estresantes como fluctuaciones de temperatura. Según Soni et al. (2019), temperaturas entre 25 y 30 °C favorecen la espirulina, mientras que cambios bruscos pueden inducir esta transformación. Una vez que los tricomas de espirulina se alteran a una forma lineal, no pueden recuperar su forma espiral, y los tricomas descendientes mantendrán esta morfología lineal, indicando que los tratamientos aplicados no afectan directamente la calidad morfológica.

Adicionalmente para que el tiempo de agitación sea un factor significativo, es necesario mantener la iluminación constante. Para alcanzar concentraciones significativas, el sistema de cultivo debe contar con una iluminación constante durante 24 horas y mantenerse en agitación continua. Así mismo, el parámetro de la temperatura juega un papel importante. Debido a que H en el cultivo de espirulina muestra una relación inversa con la temperatura del agua: a mayor altura, menor temperatura, y viceversa. La espirulina prospera entre 15 °C y 30 °C, con crecimiento ralentizado por debajo de 15 °C y efectos letales por encima de 35 °C (Ismail et al., 2016).

## 5. Conclusiones

La configuración óptima de los factores fueron los siguientes: una velocidad de agitación de 9,5 rpm, tiempo de agitación 18 h y una altura de agua de 0,225 m observando una producción inicial de 800 g de espirulina en peso seco por semana, correspondiente a 0,267 g/L. El modelo

predictivo englobando los parámetros óptimos arrojó un valor de producción de 1062,1 g de espirulina en peso seco por semana; para la validación del modelo predictivo se experimentó y resultó 1012,3 g, esto quiere decir que el modelo predictivo tiene un porcentaje de error del 4,68 %. Luego de realizar los ajustes necesarios con los parámetros, se logró incrementar esta producción a 1012,3 g de espirulina en peso seco por semana, correspondiente a 0,350 g/L, lo que representó un aumento significativo en el rendimiento del 26,54 %. Respecto a la calidad morfológica, el índice inicial de tricomas fue de 0,3; considerando los parámetros de operación, el índice de tricomas resultó 0,4.

## 6. Referencias Bibliográficas

- Al-Mahrouqi, H. A. S. (2022). *Comparative study of the optimal production of Spirulina (Arthrospira platensis) in Oman and its effect on growth and microbiota on Nile Tilapia (Oreochromis niloticus)* [Tesis doctoral, Universidad de Málaga]. <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/30437>
- Asero, L. N. (2014). *Obtención de la espirulina en polvo por secado al vacío para el enriquecimiento nutricional de los productos alimenticios* [Tesis de pregrado, Universidad Central del Ecuador]. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/2785240>
- Barboza-Rodríguez, R., Rodríguez-Jasso, R. M., Rosero-Chasoy, G., Rosales Aguado, M. L., & Ruiz, H. A. (2024). Photobioreactor configurations in cultivating microalgae biomass for biorefinery. *Bioresource Technology*, 394(130208), 130208. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130208>
- Berden Zrimec, M., Sforza, E., Pattaro, L., Carecci, D., Ficara, E., Idà, A., Ferrer-Ledo, N., Canziani, S., Mangini, S., Lazar, B., Papadaki, S., Markou, G., Tzovenis, I., & Reinhardt, R. (2024). Advances in Spirulina cultivation: Techniques, challenges, and applications. En *New Insights Into Cyanobacteria - Fundamentals, Culture Techniques, Tools and Biotechnological Uses [Working Title]*. IntechOpen.
- Escriba, C. B., y Huamaní, A. G. (2021). *Productividad de biomasa de Arthrospira platensis "espirulina", de las cepas Orovilca y Paracas en biorreactores tipo raceways en Ica, enero – junio 2018* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional San Luis Gonzaga]. <https://repositorio.unica.edu.pe/items/76c353a5-d756-4465-a791-3fbc4a2019b2>
- Fayyad, R. J., Mohammed-Ali, A. N. y Dwaish, A. S. (2019). Anticancer activity of spirulina platensis methanolic extracts against l20b and mcf7 human cancer cell lines. *Plant archives*, 19(1), 1419-1426. <https://goo.su/APF1>
- Infobae (2024. 19 de febrero). *Cuál es el alga que brinda beneficios para la salud y fue reconocida por la OMS como el alimento para el futuro.* <https://goo.su/LMpKb0>
- Martínez-Palma, N., Martínez-Ayala, A., y Dávila-Ortiz, G. (2015). Determination of antioxidant and chelating activity of protein hydrolysates from spirulina (Arthrospira maxima) obtained by simulated gastrointestinal digestion. *Revista mexicana de ingeniería química*, 14(1), 25-34. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v14n1/v14n1a3.pdf>
- Ochoa, K. Y., y Moyano, W. E. (2022). Spirulina applications - marine plant: panoramic review. *Salud Ciencia y Tecnología*, 2, 174. <https://doi.org/10.56294/saludcyt2022174>



- Oscanoa, A., Cervantes, M., y Febrero, P. (2020). Manual para la producción de biomasa microalga en condiciones de invernadero. *Inf Inst Mar Perú*, 47(3). 332-356. <https://repositorio.imarpe.gob.pe/handle/20.500.12958/3473>
- Prates, D., Duarte, J. H., Vendruscolo, R. G., Wagner, R., Ballus, C. A., da Silva Oliveira, W., Godoy, H. T., Barcia, M. T., de Moraes, M. G., Radmann, E. M., & Costa, J. A. V. (2020). Role of light emitting diode (LED) wavelengths on increase of protein productivity and free amino acid profile of *Spirulina* sp. cultures. *Bioresource Technology*, 306(123184), 123184. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123184>
- Ragaza, J. A., Hossain, M. S., Meiler, K. A., Velasquez, S. F., & Kumar, V. (2020). A review on *Spirulina*: alternative media for cultivation and nutritive value as an aquafeed. *Reviews in Aquaculture*, 12(4), 2371–2395. <https://doi.org/10.1111/raq.12439>
- Rahman, M., Mamun, M. A. A., Rathore, S. S., Nandi, S. K., Abdul Kari, Z., Wei, L. S., Tahiluddin, A. B., Rahman, M. M., Manjappa, N. K., Hossain, A., Nasren, S., Alam, M. M. M., Bottje, W. G., Téllez-Isaías, G., & Kabir, M. A. (2023). Effects of dietary supplementation of natural *Spirulina* on growth performance, hemato-biochemical indices, gut health, and disease resistance to *Aeromonas hydrophila* of Stinging catfish (*Heteropneustes fossilis*) fingerling. *Aquaculture Reports*, 32(101727), 101727. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101727>
- Sandoval-Simbaña, D. C. (2017). *Evaluación del crecimiento de espirulina (Arthrospira platensis) mediante alternativas de fertilización orgánica e inorgánica y su masificación en condiciones de campo en la Hda. El Prado* [tesis de licenciatura, Universidad de las Fuerzas Armadas]. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/14508>
- Sharoba, A. (2014). Nutritional value of *Spirulina* and its use in the preparation of some complementary baby food formulas. *Journal of Food and Dairy Sciences*, 5(8), 517–538. <https://doi.org/10.21608/jfds.2014.53033>
- Soni, R. A., Sudhakar, K., & Rana, R. S. (2019). Comparative study on the growth performance of *Spirulina platensis* on modifying culture media. *Energy Reports*, 5, 327–336. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.02.009>
- Stunda-Zujeva, A., Berele, M., Lece, A., & Šķesters, A. (2023). Comparison of antioxidant activity in various spirulina containing products and factors affecting it. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31732-3>
- Stunda-Zujeva, A., y Berele, M. (2024). Algae as a Functional Food: A Case Study on *Spirulina*. In: Abomohra, A., Ende, S. (eds) *Value-added Products from Algae*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-42026-9\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-031-42026-9_17)
- Waheed, D. M., El-Diasty, M., y Gabr, E. M. (2024). *Spirulina* as an animal feed and its effect on animal health and productivity. *Journal of Advanced Veterinary Research*, 14(2), 342-344. <https://www.advresearch.com/index.php/AVR/article/view/1531>
- Wang, Y.-Y., Xu, B.-L., Dong, C.-M., & Sun, Y.-Y. (2023). The nutritional value of *Spirulina* and utilization research. *Life Research*, 6(3), 15. <https://doi.org/10.53388/lr20230015>
- Zabala, A. (2020). *Cultivo, propiedades, beneficios y procesamiento artesanal de la espirulina* [Seminaro web]. Agro tendencia. <https://www.youtube.com/watch?v=xC-R7wg2ATk>

— **P. Velásquez et al.** Optimización de producción de espirulina en un biorreactor tipo raceway

Zhu, J., & Wakisaka, M. (2020). Harvesting of *Arthrospira platensis* by flocculation with phytic acid from rice bran. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 84(8), 1736–1744. <https://doi.org/10.1080/09168451.2020.1767498>