

Influence of technological parameters on the growth of continuous spirulina (*Arthrospira platensis*) culture in open channels

Bravo Apaza, Jinmer¹; Fernández Athó, Manuel Octavio²; Núñez Fernández, Anderson³;
Moreano Carrasco, Saul⁴; Rojas Ramos, Guillermo⁵
^{1,3,4,5}Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, Abancay, Perú, jbravo@unamba.edu.pe,
anunes@unamba.edu.pe, smoreano@unamba.edu.pe, 181111@unamba.edu.pe,
²Universidad Nacional José María Arguedas, Andahuaylas, Apurímac, Perú, mfernandez@unajma.edu.pe

Abstract– *Spirulina* cultivation is a significant activity due to its high nutritional value, including proteins, vitamins, minerals, and antioxidants. This study evaluates the influence of technological parameters on the growth and productivity of continuous *Arthrospira platensis* cultivation in open channels. The impact of temperature, flow velocity, and light intensity on biomass and nutritional values was analyzed. A fractional factorial 2k-1 experiment was designed with four treatments and three replicates under a semi-controlled environment. Inferential statistical analysis (ANOVA and multiple regression) showed that temperature is the most critical factor in biomass production ($F=4147.36$, $p=0.000$), protein content ($F=70.43$, $p=0.000$), and minerals such as magnesium, phosphorus, potassium, calcium, and iron. An increase in temperature from 18°C to 28°C led to a rise in biomass from 0.65 g/L to 0.85 g/L and enhanced protein concentration. Flow velocity also had a significant positive impact on biomass ($F=1324.96$, $p=0.000$), improving culture homogeneity and nutrient absorption when increased from 0.15 to 0.30 m/s. Meanwhile, light intensity had a negative effect at levels above 20,000 lux, reducing biomass and protein quality. Optimizing temperature and flow velocity is key to maximizing biomass and nutritional quality in open-system spirulina cultivation, while light intensity must be controlled to prevent adverse effects. The results support the development of more efficient and sustainable production systems aligned with industrial demand.

Keywords: *Arthrospira platensis*, continuous cultivation, biomass, flow velocity, light intensity.

Influencia de los parámetros tecnológicos en el crecimiento del cultivo continuo de espirulina (*Arthrospira platensis*) en canales abiertos

Bravo Apaza, Jinmer¹; Fernández Athó, Manuel Octavio²; Núñez Fernández, Anderson³;

Moreano Carrasco, Saul⁴; Rojas Ramos, Guillermo⁵

^{1,3,4,5}Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, Abancay, Perú, jbravo@unamba.edu.pe, anunes@unamba.edu.pe, smoreano@unamba.edu.pe, 181111@unamba.edu.pe,

²Universidad Nacional José María Arguedas, Andahuaylas, Apurímac, Perú, mfernandez@unajma.edu.pe

Resumen– El cultivo de espirulina es una actividad importante por el elevado valor nutricional como en proteínas, vitaminas, minerales y antioxidantes. El presente estudio evalúa la influencia de los parámetros tecnológicos en el crecimiento y productividad del cultivo continuo de *Arthrospira platensis* en canales abiertos. Se analizó el impacto de la temperatura, la velocidad de flujo y la intensidad lumínica sobre la biomasa y los valores nutricionales. Se diseñó un experimento factorial fraccionado 2^{k-1} con cuatro tratamientos y tres replicas, bajo un entorno semicontrolado. Los resultados obtenidos mediante análisis estadístico inferencial (ANOVA y regresión múltiple) demostraron que la temperatura es el factor más determinante en la producción de biomasa ($F=4147.36$, $p=0.000$), proteínas ($F=70.43$, $p=0.000$) y minerales como magnesio, fósforo, potasio, calcio y hierro. Se observó que un incremento en la temperatura de 18°C a 28°C aumentó la biomasa de 0.65 g/L a 0.85 g/L y mejoró la concentración proteica. La velocidad de flujo también tuvo un impacto positivo en la biomasa ($F=1324.96$, $p=0.000$), mejorando la homogeneidad del cultivo y la absorción de nutrientes al incrementarse de 0.15 a 0.30 m/s. Mientras tanto, la intensidad lumínica mostró un efecto negativo en valores superiores a 20,000 lux, reduciendo la biomasa y la calidad proteica. Optimizar temperatura y velocidad de flujo es clave para maximizar la biomasa y calidad nutricional en cultivo de espirulina en sistemas abiertos, mientras que la intensidad lumínica debe controlarse para evitar efectos negativos. Los resultados impulsan sistemas productivos más eficientes y sostenibles, acordes con la demanda industrial.

Palabras clave– *Arthrospira platensis*, cultivo continuo, biomasa, velocidad de flujo, intensidad lumínica.

I. INTRODUCCIÓN

La espirulina (*Arthrospira platensis*) es una microalga de alto valor nutricional y comercial debido a su riqueza en proteínas, vitaminas, minerales y antioxidantes. Su cultivo ha ganado importancia en las últimas décadas impulsado por la creciente demanda en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética. Su capacidad de crecimiento en condiciones extremas y su eficiencia en la conversión de luz solar en biomasa la posicionan como un organismo ideal para la producción sostenible de alimentos y suplementos [1,2].

Uno de los métodos más utilizados para el cultivo de espirulina a gran escala es el sistema de canales abiertos,

debido a su bajo costo y facilidad de implementación. No obstante, este sistema presenta desafíos tecnológicos significativos, ya que la optimización de variables como la velocidad de flujo, la intensidad lumínica y la temperatura es crucial para maximizar la productividad y la calidad de la biomasa [3].

El cultivo de espirulina (*Arthrospira platensis*) en sistemas de canal abierto bajo invernadero ha demostrado ser viable a largo plazo, alcanzando una productividad estable de 0.06 g/L/día y un contenido proteico superior al 60 %. La biomasa obtenida es rica en potasio y ficocianina, cumpliendo con estándares internacionales para consumo humano, lo que refuerza su potencial en la producción de alimentos y pigmentos naturales [4]. Además, el control del pH es un factor clave en el cultivo de espirulina, ya que influye en su crecimiento y en la fijación de CO₂. Un estudio piloto con un sistema automatizado identificó que el pH óptimo es 8.5, alcanzando una productividad de biomasa de 72 mg L⁻¹ día⁻¹ y una fijación de CO₂ de 0.13 g L⁻¹ día⁻¹, con altos contenidos de proteínas (64 %) y ficocianina (14 %). Aunque a pH 9.5 se observaron retrasos en la alimentación de CO₂, los resultados metabólicos fueron similares. La automatización del sistema optimiza el rendimiento y la eficiencia del cultivo [5]. Sin embargo, la saturación de luz, junto con temperaturas no óptimas, limita la productividad de las microalgas [6]. Su rápido crecimiento y versatilidad la posicionan como una alternativa ecológica para la nutrición humana. Además, su potencial terapéutico la hace prometedora en la prevención de enfermedades y como sustituto de compuestos sintéticos [7]. El 30 % de la biomasa producida globalmente, se utiliza en alimentos, cosméticos, biofertilizantes y biocombustibles. La viabilidad económica depende de factores como el medio de cultivo, sistemas de reactores (abiertos como Raceway, más económicos que los cerrados), recirculación de agua y nutrientes, y uso de energías renovables [8].

Los factores clave identificados en producción de espirulina son la temperatura, el fotoperiodo, la intensidad de luz y la inyección de dióxido de carbono; la mayor producción de biomasa se logra a 24°C y con una intensidad lumínica de 3240 lúmenes utilizando luz LED blanca; la biomasa óptima

obtenida presentó un contenido proteico del 50.44% [9]. Sin embargo, para optimizar la luz. Con iluminación de 5617,23 lux proporcionada por una lámpara de vapor de mercurio (12 horas luz/oscuridad) y una bomba de aire de 0,021 L/s, se logra una producción de biomasa seca de 3,362 g/m² y una concentración de clorofila de 0,05658 mg/L [10].

La máxima producción de biomasa de espirulina se alcanza en 168,80 horas bajo condiciones de pH 8,8, temperatura 25 °C, salinidad 1,2 % y bicarbonato 1,6 g/L. [11]. Mientras tanto el pH óptimo para maximizar el crecimiento y la producción de proteínas en el cultivo de espirulina *platensis* es 9. Bajo estas condiciones, se alcanzó la mayor tasa de crecimiento poblacional y un contenido proteico del 60.72 %, superior al obtenido a pH 10 [12].

La espirulina (*Arthrospira platensis*) es una cianobacteria de alto valor nutricional cultivada en condiciones controladas. Destaca por su contenido de proteínas, aminoácidos, minerales, vitaminas y compuestos bioactivos como la ficocianina y el ácido γ -linolénico, que benefician la salud [13]. Es una fuente importante de ficocianina, un pigmento azul valioso con propiedades terapéuticas. Su producción sostenible depende de la iluminación y tecnologías avanzadas. Gracias a su rápido crecimiento y alto contenido proteico, es ideal para fabricar biocompuestos biodegradables [14,15]. Aunque al principio la espirulina no se consideraba un alimento viable, actualmente se utiliza como aditivo y colorante natural, resaltando su valor para la salud y la industria alimentaria. Su riqueza en proteínas, vitaminas, minerales y compuestos bioactivos le otorga propiedades antioxidantes y terapéuticas, y la fermentación mejora aún más su perfil nutricional [16,17,18,19]. La espirulina es rica en aminoácidos esenciales, ácidos grasos insaturados y compuestos bioactivos como ficocianinas y carotenoides, que le confieren propiedades antioxidantes, anticancerígenas, neuroprotectoras, probióticas y antiinflamatorias, resaltando su valor en aplicaciones alimentarias y terapéuticas. [20,21]. Se puede considerar también como ingrediente clave en alimentos funcionales y medicinas, gracias a su riqueza en proteínas, betacaroteno, vitaminas y minerales. Existen necesidad de desarrollar procesos de producción más sostenibles para microalgas [22].

La composición nutricional de la espirulina cultivada en medio natural de agua de estanque es rica en proteínas, alcanzando valores de 53.29%, en cuanto a ficocianinas 18.25%; destacando también en vitaminas B, además muestra alta actividad antioxidante, siendo una alternativa rentable y eficaz para la producción a gran escala [23].

Las condiciones geográficas afectan el cultivo de espirulina al aire libre, influyendo en su crecimiento y composición. Altas temperaturas y mayor radiación solar favorecen la productividad y el contenido nutricional, mientras que el frío reduce su crecimiento, mostrando su capacidad de adaptación [24]. En cultivos al aire libre, la luz solar es la principal fuente de iluminación [25]. El sistema raceway, una técnica común en cultivos abiertos, presenta profundidades de

15-25 cm y alcanza productividades de 60-100 mg L⁻¹ d⁻¹ [26,27,28].

Los estanques circulares, con profundidades de 30-70 cm y un ancho de 45 m, fueron de los primeros sistemas para la producción a gran escala de espirulina. Su cobertura con plástico transparente reduce la contaminación y mejora la absorción de luz en comparación con los fotobiorreactores (PBR), como los de placa plana y tubulares verticales, ofrecen mayor control sobre iluminación, temperatura y contaminación, optimizando el cultivo [29].

La espirulina crece óptimamente entre 35-38 °C, con un mínimo de 15 °C, lo que limita su cultivo en estanques abiertos. Los fotobiorreactores optimizan luz, temperatura, pH y CO₂, mejorando la producción sostenible. Además, la restricción controlada de nitrógeno y fósforo a altas temperaturas puede aumentar la síntesis de lípidos. Los avances en su diseño han facilitado su escalado para bioenergía, tratamiento de aguas y suplementos alimenticios [30]. Sin embargo, la irradiación lumínica y la concentración de CO₂ afectan la fotosíntesis, acumulación de biomasa y regulación del pH en microalgas. En cultivos densos, el exceso de CO₂ y la baja penetración de luz en estanques raceway las profundidades (25-30 cm) limita el crecimiento [30,31,32].

La salinidad influye en el aroma y calidad de espirulina *platensis*. Concentraciones de 20-35 % afectan compuestos como ácido glutámico, alanina, glucosa y sacarosa, reduciéndose a mayor salinidad [33]. Además, se utiliza bicarbonato como fuente de carbono, aumentando el pH más que el CO₂. Sin embargo, el exceso de CO₂ puede inhibir el crecimiento por mayor salinidad y presión osmótica [34,35]. El cultivo continuo de espirulina en canales abiertos permite producir biomasa a gran escala para aplicaciones diversas. Su capacidad de fijar CO₂ y generar compuestos bioactivos la hace estratégica, pero requiere optimización tecnológica para mayor eficiencia y sostenibilidad [36]. Además, la calidad nutricional de la espirulina depende de la intensidad lumínica y el pH, que afectan la acumulación de proteínas y ficocianina. Su ajuste optimiza su uso en alimentos, farmacéutica y biofertilizantes, asegurando un producto de alto valor [37].

Este estudio tiene como objetivo determinar la influencia de los parámetros tecnológicos en el crecimiento del cultivo continuo de *Arthrospira platensis* en canales abiertos, con el fin de maximizar su productividad. Para ello, se analizará su impacto en los valores nutricionales de la biomasa, evaluando cómo estos factores afectan su composición y calidad. Asimismo, se estudiará su efecto en el rendimiento del cultivo, identificando las condiciones óptimas para mejorar la eficiencia productiva.

El cultivo continuo de *Arthrospira platensis* en canales abiertos tiene gran potencial en diversas industrias, pero su productividad y sostenibilidad dependen de la optimización de parámetros como temperatura, velocidad y luz ya estas afectan la biomasa, los compuestos bioactivos además aumenta el rendimiento, reduce costos y fomenta tecnologías sostenibles, haciendo el cultivo más competitivo. Esta investigación busca

optimizar estos aspectos para una producción eficiente y alineada con las demandas globales.

II. METODOLOGÍA

La investigación es aplicada y experimental, enfocada en optimizar el cultivo continuo de espirulina en canales abiertos, evaluando cómo parámetros tecnológicos como la temperatura, velocidad de flujo e intensidad lumínica que influyen en biomasa y calidad nutricional del producto. Además, la investigación es de enfoque cuantitativo; se desarrolló un entorno semicontrolado con un diseño factorial fraccionado 2^{k-1} , de donde se obtiene $2 \times 2 = 4$ tratamientos, las réplicas se realizaron por triplicado. La investigación combina niveles descriptivos y explicativos, caracterizando y estableciendo relaciones causales entre variables dependientes biomasa y valores nutricionales y variables independientes como temperatura, velocidad de flujo e intensidad lumínica.

A. Instalación de canal abierto

Se diseñó un canal abierto de acero inoxidable con capacidad de 700 litros, equipado con un sistema de recirculación de agua accionado por un motor de 1 HP. El sistema incorpora paletas y deflectores para generar turbulencia controlada y asegurar un flujo continuo y uniforme, optimizando las condiciones de aireación.

B. Preparación del medio de cultivo

Se preparó un medio de cultivo estándar enriquecido con nutrientes esenciales, como bicarbonato, nitrógeno y fósforo. Posteriormente, se ajustó las condiciones iniciales de pH, temperatura e intensidad lumínica en el canal experimental para garantizar un entorno óptimo que favorezca el crecimiento y desarrollo adecuado de la espirulina.

C. Inoculación de las microalgas espirulina

Se realizó la inoculación en el canal abierto con una densidad inicial de espirulina equivalente a 0.15 g/L de biomasa seca, asegurando una distribución uniforme para optimizar las condiciones de inicio del cultivo.

D. Monitoreo y recolección de datos

Se controlaron temperatura, velocidad de flujo y luz con sensores especializados, y la biomasa se cuantificó por microscopía y densidad. Se ajustaron agua y nutrientes según necesidad, y las muestras se secaron a peso constante en horno Venticell para determinar la biomasa final, realizando los análisis nutricionales sobre volúmenes ajustados.

E. Técnicas e instrumentos

La recolección de datos se realizó mediante observación estructurada, medición directa y análisis químicos en laboratorio. Se utilizaron sensores especializados, incluyendo un sensor multiparámetro Modelo 86031 y un microscopio binocular N-117M para la identificación de la cepa. El análisis nutricional se realizó en el laboratorio La Molina Calidad total, acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL).

F. Análisis estadístico

Incluyó métodos descriptivos e inferenciales, calculando medidas de tendencia central y medidas de dispersión de las variables dependientes. Un ANOVA multifactorial evaluó el

impacto de los parámetros tecnológicos, identificando diferencias significativas entre tratamientos. Además, un modelo de regresión múltiple determinó las condiciones óptimas para maximizar la productividad y calidad de la espirulina, asegurando un análisis preciso y riguroso.

III. RESULTADOS

A. Resultados descriptivos

Se evaluó el efecto de temperatura, velocidad de flujo y luz en la biomasa y composición nutricional de la espirulina. Se analizaron 12 muestras (N=12) con estadísticas descriptivas clave.

Tabla 1
Estadísticos descriptivos

Variable	N	Media	Desv. Est.	Varianza	Mediana	Rango
Biomasa (g/L)	12	0.7527	0.1353	0.0183	0.7200	0.3360
Proteínas (g/100g)	12	56.164	0.163	0.0266	56.145	0.470
Magnesio (mg/100g)	12	291.38	14.17	200.76	292.58	38.95
Fosforo (mg/100g)	12	1115.6	72.5	5261.0	1124.7	193.0
Potasio (mg/100g)	12	2195.6	114.3	13066.3	2190.5	303.1
Calcio (mg/100g)	12	55.381	3.278	10.743	55.440	9.350
Hierro (mg/100g)	12	25.066	3.045	9.275	25.500	8.630

El análisis estadístico descriptivo de 12 muestras evidenció una biomasa estable y homogénea, con bajo coeficiente de variabilidad. El contenido proteico fue elevado y uniforme, mientras que potasio y fósforo presentaron las mayores concentraciones y mayor dispersión. Las variables siguieron una distribución normal, validando el uso de análisis paramétricos y demostrando precisión y confiabilidad del sistema evaluado.

B. Resultados inferenciales

El ANOVA es utilizado en la investigación para evaluar la influencia de los factores de investigación sobre las variables de respuesta, de donde se determinan las significancias de los efectos principales e interacciones, de tal manera se puedan optimizar procesos experimentales.

Tabla 2
Análisis predictivo de Biomasa (g/L) mediante regresión múltiple basada en factores operacionales

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	3	0.200976	0.066992	2009.76	0.000
Temperatura (°C)	1	0.138245	0.138245	4147.36	0.000
velocidad de flujo (m/s)	1	0.044165	0.044165	1324.96	0.000
Intensidad lumínica (lux)	1	0.018565	0.018565	556.96	0.000
Error	8	0.000267	0.000033		
Total	11	0.201243			

El ANOVA confirma que el modelo de regresión es altamente significativo ($p < 0.001$), explicando casi toda la variabilidad en la biomasa (SC Regresión = 0.200976 de 0.201243). La temperatura ($F=4147.36$) tiene el mayor impacto, seguida de la velocidad de flujo ($F=1324.96$) y la intensidad lumínica ($F=556.96$), todos con significancia estadística ($p=0.000$). El error es mínimo (SC Error = 0.000267), lo que indica un excelente ajuste del modelo y confirma que los tres factores afectan significativamente la biomasa, con la temperatura como el factor predominante.

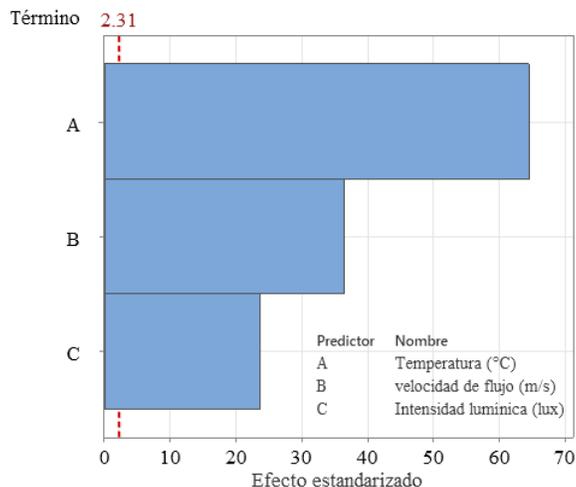


Fig. 1

Diagrama de Pareto de efectos en Biomasa (g/l) $\alpha = 0.05$

El Diagrama de Pareto indica que la temperatura (A) es el factor más influyente en la biomasa, seguida por la velocidad (B) de flujo y en menor medida, la intensidad lumínica (C). Todos los factores son estadísticamente significativos ($\alpha=0.05$), superando el umbral de 2.31.

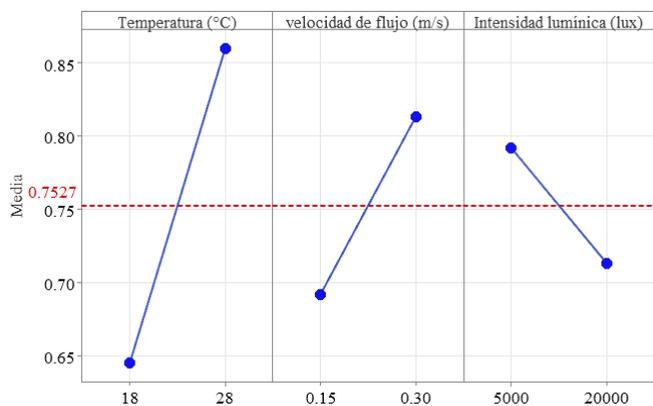


Fig. 2

Gráfica de efectos principales para biomasa (g/l)

La gráfica de efectos principales muestra que la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) tiene el mayor impacto positivo en la biomasa, aumentando significativamente de 0.65 g/L a 0.85

g/L al pasar de 18°C a 28°C . La velocidad de flujo (m/s) también influye positivamente, mejorando la biomasa de 0.70 g/L a 0.80 g/L al incrementar de 0.15 a 0.30 m/s. En contraste, la intensidad lumínica (lux) tiene un efecto negativo, reduciendo la biomasa de 0.77 g/L a 0.73 g/L al aumentar de 5000 a 20000 lux. Estadísticamente, la temperatura es el factor más crítico para maximizar la producción de biomasa, seguido de la velocidad de flujo, mientras que la alta intensidad lumínica parece ser perjudicial.

Tabla 3

Análisis predictivo de Proteína (g/L) mediante regresión múltiple basada en factores operacionales

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	3	0.269158	0.089719	30.76	0.000
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	1	0.205408	0.205408	70.43	0.000
velocidad de flujo (m/s)	1	0.054675	0.054675	18.75	0.003
Intensidad lumínica (lux)	1	0.009075	0.009075	3.11	0.116
Error	8	0.023333	0.002917		
Total	11	0.292492			

El ANOVA indica que el modelo de regresión es altamente significativo ($p < 0.001$, $F=30.76$), explicando la mayor parte de la variabilidad en la biomasa (SC Regresión = 0.269158 de 0.292492). La temperatura ($F=70.43$, $p=0.000$) es el factor más influyente, seguida por la velocidad de flujo ($F=18.75$, $p=0.003$), ambos con efectos significativos. En contraste, la intensidad lumínica ($F=3.11$, $p=0.116$) no es estadísticamente significativa. La baja variabilidad del error (SC Error = 0.023333) confirma un buen ajuste del modelo.

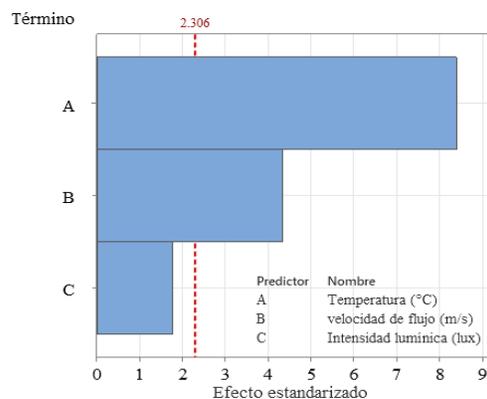


Fig. 3

Diagrama de Pareto de efectos en Proteína (g/100l) $\alpha = 0.05$

El Diagrama de Pareto muestra que la temperatura (A) es el factor con mayor impacto en la biomasa, seguida por la velocidad de flujo (B), ambos superando el umbral de significancia (2.306), lo que indica que sus efectos son estadísticamente relevantes. En contraste, la intensidad

lumínica (C) no supera el umbral crítico, lo que sugiere que su influencia no es significativa en el modelo.

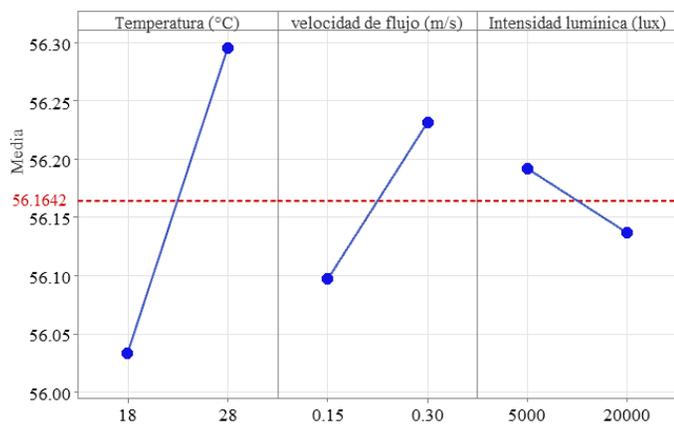


Fig. 4

Gráfica de efectos principales para proteína (g/100g) $\alpha = 0.05$

La gráfica de efectos principales muestra que la temperatura (°C) tiene el mayor impacto positivo en el contenido de proteínas, aumentando al incrementar de 18°C a 28°C. La velocidad de flujo (m/s) también mejora la concentración proteica al aumentar de 0.15 a 0.30 m/s. En contraste, la intensidad lumínica (lux) tiene un efecto negativo, reduciendo el contenido proteico a 20,000 lux. Estadísticamente, la temperatura es el factor más influyente, seguido por la velocidad de flujo, mientras que una mayor intensidad lumínica perjudica la producción de proteínas.

Tabla 4

Análisis predictivo de magnesio (mg/100g) mediante regresión múltiple basada en factores operacionales

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	3	2134.43	711.48	76.98	0.000
Temperatura (°C)	1	2006.48	2006.48	217.09	0.000
velocidad de flujo (m/s)	1	127.73	127.73	13.82	0.006
Intensidad lumínica (lux)	1	0.22	0.22	0.02	0.881
Error	8	73.94	9.24		
Total	11	2208.37			

El ANOVA indica que el modelo de regresión es altamente significativo ($p < 0.001$, $F = 76.98$), explicando casi toda la variabilidad en la respuesta (SC Regresión = 2134.43 de 2208.37). La temperatura ($F = 217.09$, $p = 0.000$) es el factor más influyente, seguida por la velocidad de flujo ($F = 13.82$, $p = 0.006$), ambos con efectos significativos. En contraste, la intensidad lumínica ($F = 0.02$, $p = 0.881$) no tiene impacto en la respuesta. La baja variabilidad del error (SC Error = 73.94) confirma un buen ajuste del modelo, sugiriendo que la

optimización debe enfocarse en temperatura y velocidad de flujo, ya que la intensidad lumínica no es relevante.

Término

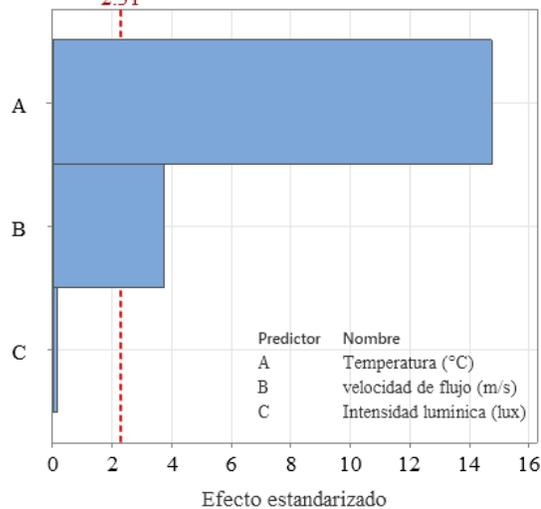


Fig. 5

Diagrama de Pareto de efectos en magnesio (mg/100g) $\alpha = 0.05$

El diagrama de Pareto indica que la temperatura (A) tiene el mayor impacto significativo en la concentración de magnesio (mg/100g), seguida por la velocidad de flujo (B), ambos superando el umbral de 2.31, lo que confirma su relevancia estadística ($\alpha = 0.05$). En contraste, la intensidad lumínica (C) no es significativa, ya que su efecto es menor al umbral crítico. Estadísticamente, la temperatura es el factor más determinante.

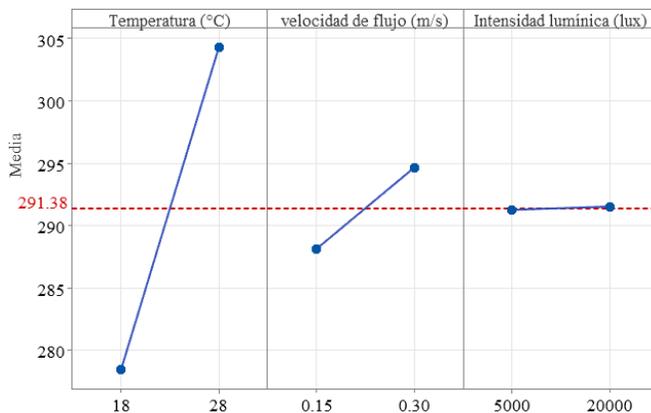


Fig. 6

Gráfica de efectos principales para magnesio (mg/100g)

La gráfica de efectos principales muestra que la temperatura (°C) tiene el mayor impacto positivo en la concentración de magnesio (mg/100g), aumentando significativamente cuando pasa de 18°C a 28°C. La velocidad de flujo (m/s) también influye positivamente, incrementando el contenido de magnesio al aumentar de 0.15 a 0.30 m/s. En contraste, la intensidad lumínica (lux) no muestra un efecto relevante, ya que los valores se mantienen constantes.

Estadísticamente, la temperatura es el factor más determinante.

Tabla 5

Análisis predictivo de magnesio (mg/100g) mediante regresión múltiple basada en factores operacionales

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	3	57036.2	19012.1	182.14	0.000
Temperatura (°C)	1	49606.2	49606.2	475.24	0.000
velocidad de flujo (m/s)	1	6081.3	6081.3	58.26	0.000
Intensidad lumínica (lux)	1	1348.7	1348.7	12.92	0.007
Error	8	835.1	104.4		
Total	11	57871.3			

El ANOVA muestra que el modelo de regresión es altamente significativo ($p < 0.001$, $F = 182.14$), explicando casi toda la variabilidad en la respuesta (SC Regresión = 57036.2 de 57871.3). La temperatura ($F = 475.24$, $p = 0.000$) es el factor más influyente, seguida por la velocidad de flujo ($F = 58.26$, $p = 0.000$) y en menor medida, la intensidad lumínica ($F = 12.92$, $p = 0.007$), que también es significativa. La baja variabilidad del error (SC Error = 835.1) indica un excelente ajuste del modelo.

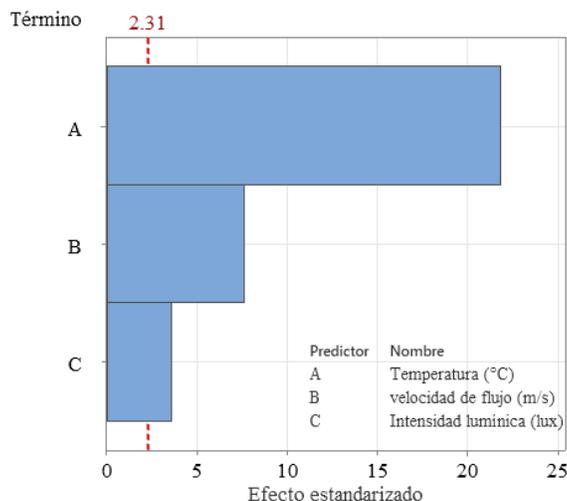


Fig. 7

Diagrama de Pareto de efectos para fósforo (mg/100g) $\alpha = 0.05$

El diagrama de Pareto indica que la temperatura (A) es el factor con mayor impacto en la concentración de fósforo (mg/100g), seguida por la velocidad de flujo (B), ambos con efectos estadísticamente significativos al superar el umbral crítico de 2.31 ($\alpha = 0.05$). En contraste, la intensidad lumínica (C) tiene un efecto menor y no significativo. Estadísticamente, la temperatura es el factor clave.

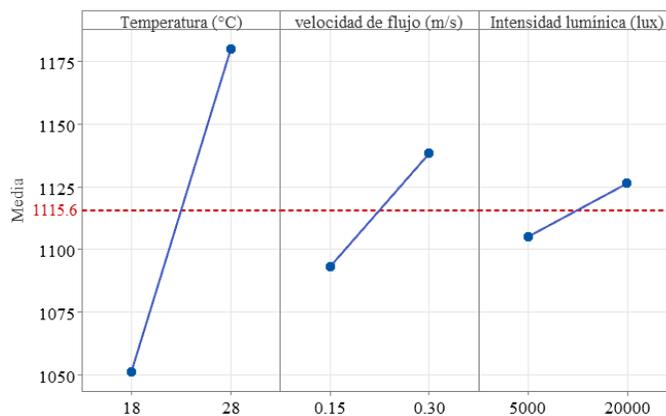


Fig. 8

Gráfica de efectos principales para fósforo (mg/100g)

La gráfica de efectos principales muestra que la temperatura (°C) tiene el mayor impacto positivo en la concentración de fósforo (mg/100g), aumentando significativamente al pasar de 18°C a 28°C. La velocidad de flujo (m/s) también incrementa la concentración de fósforo al aumentar de 0.15 a 0.30 m/s, aunque en menor medida. En contraste, la intensidad lumínica (lux) muestra un efecto poco relevante, con una variación mínima en la respuesta.

Tabla 6

Análisis predictivo de potasio (mg/100g) mediante regresión múltiple basada en factores operacionales

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	3	141994	47331	218.17	0.000
Temperatura (°C)	1	114633	114633	528.39	0.000
velocidad de flujo (m/s)	1	27361	27361	126.12	0.000
Intensidad lumínica (lux)	1	0	0	0.00	0.998
Error	8	1736	217		
Total	11	143730			

El ANOVA muestra que el modelo de regresión es altamente significativo ($p < 0.001$, $F = 218.17$), explicando casi toda la variabilidad en la respuesta (SC Regresión = 141994 de 143730). La temperatura ($F = 528.39$, $p = 0.000$) es el factor con mayor impacto, seguida por la velocidad de flujo ($F = 126.12$, $p = 0.000$), ambos con efectos altamente significativos. En contraste, la intensidad lumínica ($F = 0.00$, $p = 0.998$) no tiene ningún efecto en la respuesta. La baja variabilidad del error (SC Error = 1736) indica un excelente ajuste del modelo, confirmando que temperatura y velocidad de flujo son los factores clave a optimizar, mientras que la intensidad lumínica no influye en el resultado.

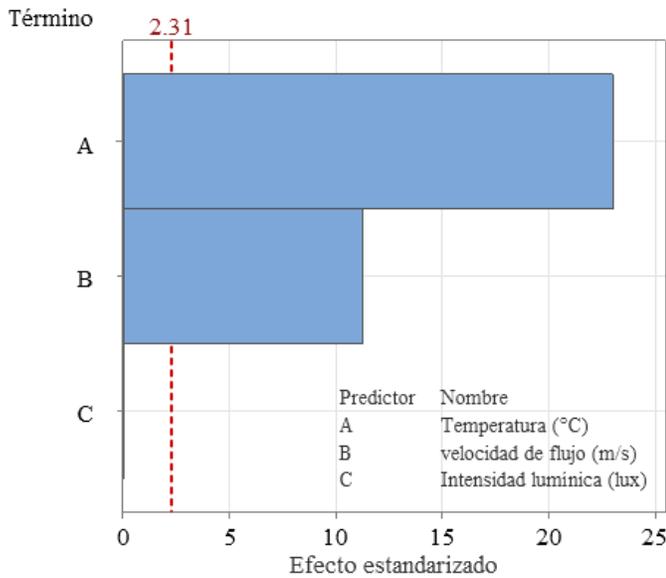


Fig. 9

Diagrama de Pareto de efectos para potasio (mg/100g) $\alpha=0.05$

El diagrama de Pareto muestra que la temperatura (A) es el factor con mayor impacto en la concentración de potasio (mg/100g), seguida por la velocidad de flujo (B), ambos con efectos estadísticamente significativos al superar el umbral de 2.31 ($\alpha=0.05$). Mientras tanto la intensidad lumínica (C) no tiene un efecto significativo, ya que su valor es menor al umbral crítico. Estadísticamente, la temperatura es el factor determinante, seguida de la velocidad de flujo, mientras que la intensidad lumínica no influye en la variabilidad del potasio.

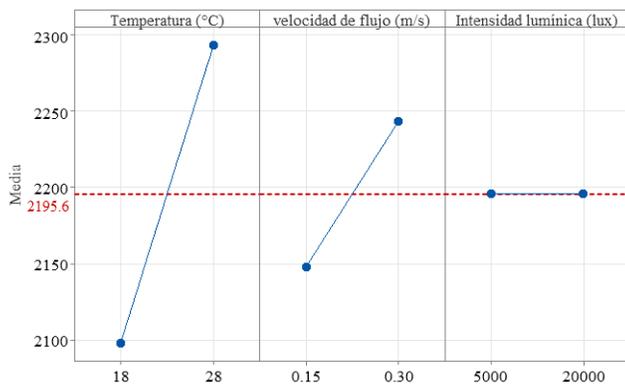


Fig. 10

Gráfica de efectos principales para potasio (mg/100g)

La gráfica de efectos principales muestra que la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) tiene el mayor impacto positivo en la concentración de potasio (mg/100g), aumentando significativamente al pasar de 18°C a 28°C . La velocidad de flujo (m/s) también incrementa la concentración de potasio al aumentar de 0.15 a 0.30 m/s, aunque en menor medida. La intensidad lumínica (lux) no muestra un efecto relevante, ya que su variación no afecta significativamente la respuesta. Estadísticamente, la temperatura es el factor más

determinante, seguida de la velocidad de flujo, mientras que la intensidad lumínica no influye en la concentración de potasio.

Tabla 7

Análisis predictivo de calcio (mg/100g) mediante regresión múltiple basada en factores operacionales

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	3	117.017	39.0057	270.50	0.000
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	1	71.981	71.9810	499.17	0.000
velocidad de flujo (m/s)	1	44.815	44.8147	310.78	0.000
Intensidad lumínica (lux)	1	0.221	0.2214	1.54	0.250
Error	8	1.154	0.1442		
Total	11	118.171			

El ANOVA muestra que el modelo de regresión es altamente significativo ($p<0.001$, $F=270.50$), explicando casi toda la variabilidad en la respuesta (SC Regresión = 117.017 de 118.171). La temperatura ($F=499.17$, $p=0.000$) es el factor más influyente, seguida por la velocidad de flujo ($F=310.78$, $p=0.000$), ambos con efectos altamente significativos. Mientras tanto, la intensidad lumínica ($F=1.54$, $p=0.250$) no tiene un impacto significativo. La baja variabilidad del error (SC Error = 1.154) indica un excelente ajuste del modelo.

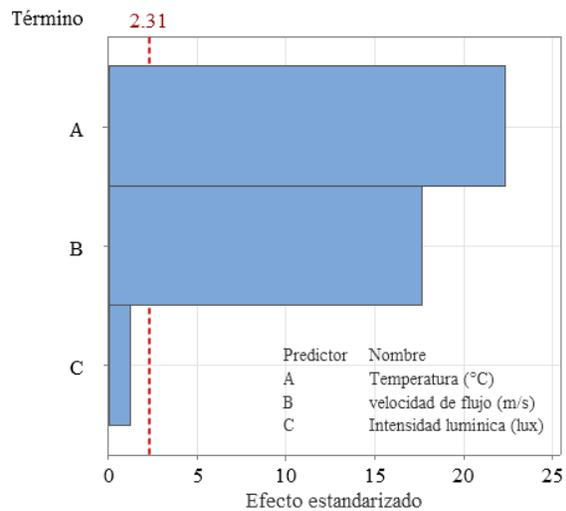


Fig. 11

Diagrama de Pareto de efectos para calcio (mg/100g) $\alpha=0.05$

El Diagrama de Pareto muestra que la temperatura (A) es el factor con mayor impacto en la concentración de calcio (mg/100g), seguida por la velocidad de flujo (B), ambos con efectos estadísticamente significativos al superar el umbral crítico de 2.31 ($\alpha=0.05$). En contraste, la intensidad lumínica (C) no es significativa y su efecto es prácticamente nulo. Estadísticamente, la temperatura es el factor clave, seguida de la velocidad de flujo, mientras que la intensidad lumínica no tiene una influencia relevante en la concentración de calcio.

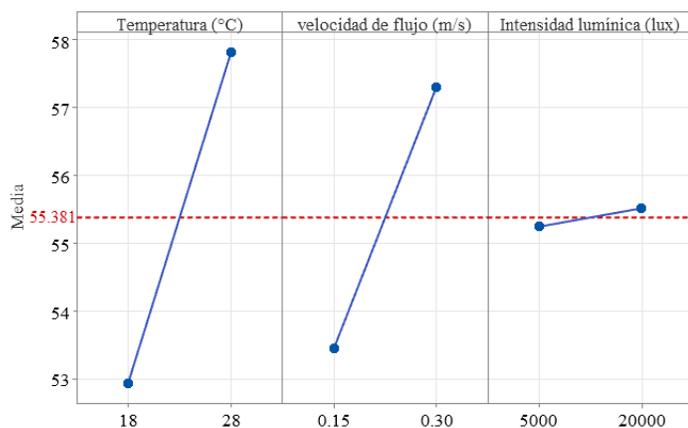


Fig. 12

Gráfica de efectos principales para calcio (mg/100g)

La gráfica de efectos principales muestra que la temperatura (°C) tiene el mayor impacto positivo en la concentración de calcio (mg/100g), aumentando significativamente al pasar de 18°C a 28°C. La velocidad de flujo (m/s) también incrementa la concentración de calcio al aumentar de 0.15 a 0.30 m/s, aunque en menor medida. En contraste, la intensidad lumínica (lux) no muestra un efecto relevante, ya que su variación no afecta significativamente la respuesta. Estadísticamente, la temperatura es el factor más determinante, seguida de la velocidad de flujo, mientras que la intensidad lumínica no influye en la concentración de calcio.

Tabla 8

Análisis predictivo de hierro (mg/100g) mediante regresión múltiple basada en factores operacionales

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	3	100.846	33.6155	228.64	0.000
Temperatura (°C)	1	64.079	64.0794	435.84	0.000
velocidad de flujo (m/s)	1	34.918	34.9184	237.50	0.000
Intensidad lumínica (lux)	1	1.849	1.8487	12.57	0.008
Error	8	1.176	0.1470		
Total	11	102.023			

El ANOVA indica que el modelo de regresión es altamente significativo ($p < 0.001$, $F = 228.64$), explicando casi toda la variabilidad en la respuesta (SC Regresión = 100.846 de 102.023). La temperatura ($F = 435.84$, $p = 0.000$) es el factor con mayor impacto, seguida por la velocidad de flujo ($F = 237.50$, $p = 0.000$), ambos con efectos altamente significativos. La intensidad lumínica ($F = 12.57$, $p = 0.008$) también tiene un impacto significativo, aunque en menor medida. La baja variabilidad del error (SC Error = 1.176) indica un excelente ajuste del modelo.

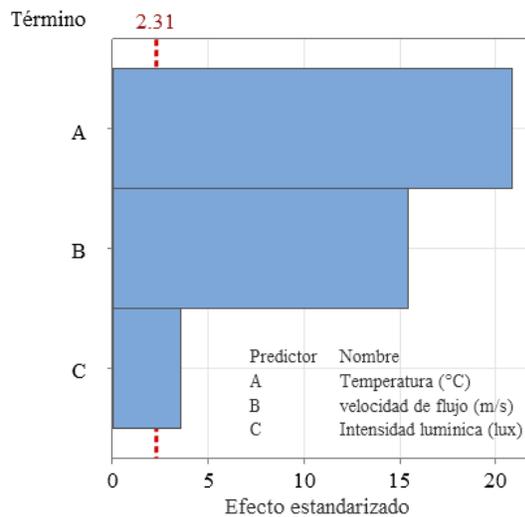


Fig. 13

Diagrama de Pareto para hierro (mg/100g) $\alpha = 0.05$

El Diagrama de Pareto muestra que la temperatura (A) es el factor con mayor impacto en la concentración de hierro (mg/100g), seguida por la velocidad de flujo (B), ambos con efectos estadísticamente significativos al superar el umbral de 2.31 ($\alpha = 0.05$). En contraste, la intensidad lumínica (C) tiene un efecto menor y no significativo. Estadísticamente, la temperatura es el factor clave, seguida de la velocidad de flujo, mientras que la intensidad lumínica no influye de manera relevante en la concentración de hierro.

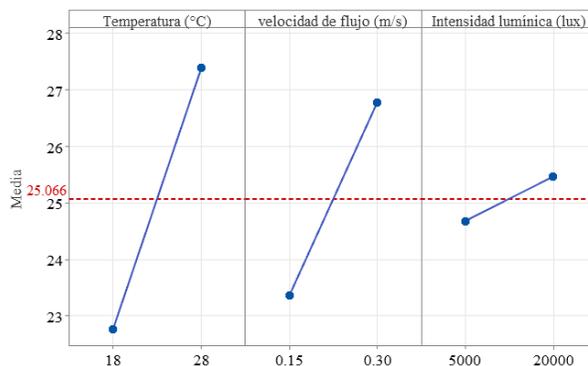


Fig. 14

Gráfica de efectos principales para hierro (mg/100g)

La gráfica de efectos principales muestra que la temperatura (°C) tiene el mayor impacto positivo en la concentración de hierro (mg/100g), aumentando significativamente al pasar de 18°C a 28°C. La velocidad de flujo (m/s) también incrementa la concentración de hierro al aumentar de 0.15 a 0.30 m/s, aunque en menor medida. La intensidad lumínica (lux) presenta un leve efecto positivo, pero su impacto es menor en comparación con los otros factores. Estadísticamente, la temperatura es el factor más determinante, seguida por la velocidad de flujo, mientras que la intensidad lumínica tiene una influencia menos significativa en la concentración de hierro.

Discusión. - Los resultados obtenidos confirman que los parámetros tecnológicos, especialmente la temperatura y la velocidad de flujo, tienen un impacto significativo en la productividad y calidad nutricional del cultivo continuo de *Arthrospira platensis* en canales abiertos. El análisis inferencial mediante ANOVA y regresión múltiple mostró que la temperatura es el factor más determinante en la producción de biomasa ($F=4147.36$, $p=0.000$), proteínas ($F=70.43$, $p=0.000$) y minerales como magnesio, fósforo, potasio, calcio y hierro, seguido por la velocidad de flujo. En contraste, la intensidad lumínica tuvo un efecto menor y, en algunos casos, negativo, reduciendo la biomasa y el contenido proteico a altas intensidades ($>20,000$ lux). Estos hallazgos coinciden con estudios previos que destacan la importancia del control de temperatura y flujo para optimizar el crecimiento y la acumulación de compuestos bioactivos en la espirulina [1,2,3].

La capacidad de la espirulina para fijar CO_2 y convertirlo en biomasa de alto valor nutricional ha sido ampliamente documentada [4,5]. En este estudio, se encontró que la biomasa producida alcanzó hasta 0.85 g/L cuando la temperatura se incrementó de $18^\circ C$ a $28^\circ C$, lo que confirma su relevancia como parámetro crítico. Resultados similares han sido reportados en cultivos de canal abierto bajo invernadero, donde la temperatura óptima y el pH adecuado ($8.5-9$) permitieron altos rendimientos y calidad nutricional [6,7]. Sin embargo, la alta irradiación lumínica puede ser perjudicial, lo que concuerda con estudios previos que evidencian una saturación lumínica que limita la eficiencia fotosintética [8].

Asimismo, la optimización del flujo del medio de cultivo mejoró la producción de biomasa y proteínas. El incremento de la velocidad de flujo de 0.15 a 0.30 m/s aumentó significativamente el contenido proteico y mineral, alineándose con investigaciones que destacan la importancia de una adecuada recirculación del medio para mejorar la disponibilidad de nutrientes y la homogeneidad del cultivo [9,10]. En contraste, la intensidad lumínica no tuvo un efecto significativo en la acumulación de minerales como magnesio, fósforo, potasio y calcio, lo que sugiere que su impacto es menor en la absorción de estos elementos [11,12].

Desde una perspectiva productiva, estos resultados refuerzan la necesidad de optimizar las condiciones tecnológicas para hacer más eficiente y rentable el cultivo de espirulina en canales abiertos. Estudios previos han señalado que la viabilidad económica de estos sistemas depende de la optimización de parámetros como temperatura, recirculación de agua y uso de energías renovables [13,14]. La presente investigación confirma que el control preciso de la temperatura y el flujo del medio es esencial para mejorar el rendimiento del cultivo, reducir costos y promover un sistema de producción sostenible.

IV. CONCLUSIONES

La investigación confirmó que los parámetros tecnológicos tienen un impacto significativo en el crecimiento del cultivo continuo de espirulina (*Arthrospira platensis*) en canales abiertos, siendo la temperatura y la velocidad de flujo los factores más determinantes. A través del análisis inferencial se evidenció que estos parámetros optimizan la productividad y calidad de la biomasa, mientras que la intensidad lumínica mostró efectos menos relevantes e incluso negativos en altas intensidades.

El análisis de los valores nutricionales indicó que la temperatura es el principal factor que influye en la acumulación de proteínas y minerales en la espirulina. Se observó un aumento significativo en el contenido proteico y la concentración de macronutrientes como magnesio, fósforo, potasio, calcio y hierro al incrementar la temperatura de $18^\circ C$ a $28^\circ C$ y la velocidad de flujo de 0.15 a 0.30 m/s. En contraste, la alta intensidad lumínica redujo la concentración de proteínas, lo que sugiere que su control es clave para mejorar la calidad nutricional de la biomasa.

En términos de rendimiento del cultivo, los resultados mostraron que la temperatura y la velocidad de flujo favorecen la producción de biomasa, con un aumento significativo de 0.65 g/L a 0.85 g/L cuando la temperatura se incrementó de $18^\circ C$ a $28^\circ C$. Asimismo, la velocidad de flujo optimizó la eficiencia del sistema, favoreciendo una distribución homogénea de los nutrientes y evitando la sedimentación del cultivo. La intensidad lumínica, en cambio, tuvo un efecto negativo a valores superiores a $20,000$ lux, reduciendo la productividad.

AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento al Vicerrectorado de Investigación, a través de la Dirección de Institutos de Investigación de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, por el financiamiento para la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] C. J. Glover, A. McDonnell, K. S. Rollins, S. R. Hiibel, y P. K. Cornejo, «Assessing the environmental impact of resource recovery from dairy manure», *J Environ Manage*, vol. 330, mar. 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.117150.
- [2] R. Malpartida Y., L. Aldana F., K. Sánchez S., L. Gómez H., y J. Lobo P., «El valor nutricional y compuestos bioactivos de la Espirulina: Potencial suplemento alimenticio», *Ecuadorian Science Journal*, vol. 6, n.o 1, pp. 42-51, mar. 2022, doi: 10.46480/esj.6.1.133.
- [3] Mariana Manzoni Maroneze, Carlos Alberto Montenegro Herrera, y Alfredo Martínez Jiménez, «Perspectivas sobre los sistemas de cultivo de microalgas», *BioTecnología*, vol. 25, n.o 5, 2021.
- [4] F. Guidi, Z. Gojkovic, M. Venuleo, P. A. C. J. Assunção, y E. Portillo, «Long-Term Cultivation of a Native *Arthrospira platensis* (Spirulina) Strain in Pozo Izquierdo (Gran Canaria, Spain): Technical Evidence for a Viable Production of Food-Grade Biomass», *Processes*, vol. 9, n.o 8, p. 1333, jul. 2021, doi: 10.3390/pr9081333.
- [5] J. Mehar, A. Shekh, N. M. U., R. Sarada, V. S. Chauhan, y S. Mudliar, «Automation of pilot-scale open raceway pond: A case study of CO_2

- fed pH control on *Spirulina* biomass, protein and phycocyanin production», *Journal of CO2 Utilization*, vol. 33, pp. 384-393, oct. 2019, doi: 10.1016/j.jcou.2019.07.006.
- [6] G. Torzillo, G. C. Zittelli, A. M. Silva Benavides, K. Ranglova, y J. Masojidek, «Culturing of microalgae for food applications», en *Cultured Microalgae for the Food Industry*, Elsevier, 2021, pp. 1-48. doi: 10.1016/B978-0-12-821080-2.00002-2.
- [7] M. A. R. Shah et al., «Mechanistic insights into the nutritional and therapeutic potential of *Spirulina* (*Arthrospira*) spp.: Challenges and opportunities», *Trends Food Sci Technol*, vol. 151, p. 104648, sep. 2024, doi: 10.1016/j.tifs.2024.104648.
- [8] J. A. V. Costa, B. C. B. Freitas, G. M. Rosa, L. Moraes, M. G. Morais, y B. G. Mitchell, «Operational and economic aspects of *Spirulina*-based biorefinery», *Bioresour Technol*, vol. 292, p. 121946, nov. 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2019.121946.
- [9] J. I. Laura Huaman, «Modelamiento matemático para la optimización de los factores que influyen en la producción de biomasa de *spirulina* (*Arthrospira platensis*) como una alternativa de mitigación de la contaminación del aire por fijación de CO2 atmosférico», Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa - Perú, 2021.
- [10] Ronald Huarachi, Ursulo Yapo, Alex Dueñas, Joe Soto, y Rosaura González, «Producción de *spirulina platensis* (cyanophyta) en fotobiorreactor tubular cónico bajo condiciones de laboratorio», *Tha Biologist*, vol. 11, n.o 2, pp. 217-227, 2013.
- [11] V. Vasquez-Villalobos et al., «Influencia de la proporción agua de mar y bicarbonato en la producción de biomasa de *Spirulina* sp. con iluminación de diodo emisor de luz», *Scientia Agropecuaria*, pp. 199-209, mar. 2010, doi: 10.17268/sci.agropecu.2014.04.04.
- [12] Barreto González, Mery Carmen, Chepe Delgado, y Verónica Matilde, «Cultivo de *Spirulina platensis* en diferentes niveles de pH y rendimiento de proteínas», UNPRG-Institucional, 2021.
- [13] D. Wan, Q. Wu, y K. Kuča, «*Spirulina*», en *Nutraceuticals*, Elsevier, 2021, pp. 959-974. doi: 10.1016/B978-0-12-821038-3.00057-4.
- [14] B. Thevarajah, S. Piyatilleke, P. H. V. Nimarshana, S. Koushalya, A. Malik, y T. U. Ariyadasa, «Exploring effective light spectral conversion techniques for enhanced production of *Spirulina*-derived blue pigment protein, c-phycocyanin», *Bioresour Technol*, vol. 399, p. 130612, may 2024, doi: 10.1016/j.biortech.2024.130612.
- [15] C. Kothawale, P. Varma, y B. Kandasubramanian, «Innovations in biodegradable materials: Harnessing *Spirulina* algae for sustainable biocomposite production», *Bioresour Technol Rep*, vol. 28, p. 101965, dic. 2024, doi: 10.1016/j.biteb.2024.101965.
- [16] S. Villaró-Cos, J. L. Guzmán Sánchez, G. Ación, y T. Lafarga, «Research trends and current requirements and challenges in the industrial production of *spirulina* as a food source», *Trends Food Sci Technol*, vol. 143, p. 104280, ene. 2024, doi: 10.1016/j.tifs.2023.104280.
- [17] Y. Ladjal-Ettoumi, M. Hamadi, L. Hadjer Douik, Z. Cherifi, y A. Nazir, «Physicochemical, functional, and nutraceutical properties of *Spirulina* and *Chlorella* biomass: A comparative study», *Algal Res*, vol. 81, p. 103561, jul. 2024, doi: 10.1016/j.algal.2024.103561.
- [18] K. Jakubczyk, K. Melkis, B. Dalewski, y K. Janda-Milczarek, «Assessment of antioxidant properties and mycotoxin profile of commercial *spirulina* supplements», *Food Biosci*, vol. 62, p. 105461, dic. 2024, doi: 10.1016/j.fbio.2024.105461.
- [19] A. Prasetyo et al., «Composition and essential nutrients of cyanobacterium meal produced from *spirulina* (*Arthrospira platensis*) fermented by yeast on small-scale», *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 10, p. 100940, dic. 2024, doi: 10.1016/j.csee.2024.100940.
- [20] D. G. Bortolini et al., «Functional properties of bioactive compounds from *Spirulina* spp.: Current status and future trends», *Food Chemistry: Molecular Sciences*, vol. 5, p. 100134, dic. 2022, doi: 10.1016/j.fochms.2022.100134.
- [21] Z. Akbarbaglu, A. Ayaseh, B. Ghanbarzadeh, y K. Sarabandi, «Techno-functional, biological and structural properties of *Spirulina platensis* peptides from different proteases», *Algal Res*, vol. 66, p. 102755, jul. 2022, doi: 10.1016/j.algal.2022.102755.
- [22] C. Ye et al., «Life cycle assessment of industrial scale production of *spirulina* tablets», *Algal Res*, vol. 34, pp. 154-163, sep. 2018, doi: 10.1016/j.algal.2018.07.013.
- [23] A. Rahim et al., «Chemical characterization and nutritional value of *Spirulina platensis* cultivated in natural conditions of Chichaoua region (Morocco)», *South African Journal of Botany*, vol. 141, pp. 235-242, sep. 2021, doi: 10.1016/j.sajb.2021.05.006.
- [24] C. S. de Jesus et al., «Outdoor pilot-scale cultivation of *Spirulina* sp. LEB-18 in different geographic locations for evaluating its growth and chemical composition», *Bioresour Technol*, vol. 256, pp. 86-94, may 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2018.01.149.
- [25] M. E. M. Soudagar et al., «Perspectives on cultivation and harvesting technologies of microalgae, towards environmental sustainability and life cycle analysis», *Chemosphere*, vol. 353, p. 141540, abr. 2024, doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.141540.
- [26] E.-S. Salama et al., «Recent progress in microalgal biomass production coupled with wastewater treatment for biofuel generation», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, pp. 1189-1211, nov. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.091.
- [27] S. K. Saha y P. Murray, «Exploitation of Microalgae Species for Nutraceutical Purposes: Cultivation Aspects», *Fermentation*, vol. 4, n.o 2, p. 46, jun. 2018, doi: 10.3390/fermentation4020046.
- [28] S. A. Razzak, M. M. Hossain, R. A. Lucky, A. S. Bassi, y H. de Lasa, «Integrated CO2 capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing—A review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 622-653, nov. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.05.063.
- [29] M. E. M. Soudagar et al., «Perspectives on cultivation and harvesting technologies of microalgae, towards environmental sustainability and life cycle analysis», *Chemosphere*, vol. 353, p. 141540, abr. 2024, doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.141540.
- [30] S. Abdur Razzak et al., «Microalgae cultivation in photobioreactors: sustainable solutions for a greener future», *Green Chemical Engineering*, vol. 5, n.o 4, pp. 418-439, dic. 2024, doi: 10.1016/j.gce.2023.10.004.
- [31] Q. Béchet, A. Shilton, y B. Guieysse, «Modeling the effects of light and temperature on algae growth: State of the art and critical assessment for productivity prediction during outdoor cultivation», *Biotechnol Adv*, vol. 31, n.o 8, pp. 1648-1663, dic. 2013, doi: 10.1016/j.biotechadv.2013.08.014.
- [32] K. Sirikulrat, J. Pekkoh, y C. Pumas, «Illumination system for growth and net energy ratio enhancement of *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis* outdoor cultivation in deep raceway ponds», *Bioresour Technol Rep*, vol. 14, p. 100661, jun. 2021, doi: 10.1016/j.biteb.2021.100661.
- [33] T. Uzlasir, O. Isik, L. H. Uslu, S. Selli, y H. Kelebek, «Impact of different salt concentrations on growth, biochemical composition and nutrition quality of *Phaeodactylum tricornutum* and *Spirulina platensis*», *Food Chem*, vol. 429, p. 136843, dic. 2023, doi: 10.1016/j.foodchem.2023.136843.
- [34] M. J. D. Latagan et al., «Bicarbonate-based microalgal cultivation technologies: Mechanisms, critical strategies, and future perspectives», *Chemical Engineering Journal*, vol. 502, p. 157998, dic. 2024, doi: 10.1016/j.cej.2024.157998.
- [35] D. Soletto et al., «Effects of carbon dioxide feeding rate and light intensity on the fed-batch pulse-feeding cultivation of *Spirulina platensis* in helical photobioreactor», *Biochem Eng J*, vol. 39, n.o 2, pp. 369-375, abr. 2008, doi: 10.1016/j.bej.2007.10.007.
- [36] R. E. Huarachi Olivera, U. A. Yapo Pari, A. P. Dueñas Gonza, J. Condori Huamanga, D. Pacheco Salazar, y J. Soto Flores, «Cultivo de *Arthrospira platensis* (*Spirulina*) en fotobiorreactor tubular doblemente curvado a condiciones ambientales en el sur del Perú», *Rev Colomb Biotechnol*, vol. 17, n.o 1, pp. 143-150, may 2015, doi: 10.15446/rev.colomb.biote.v17n1.50679.
- [37] E. Rodríguez De Marco, M. E. Steffolani, C. S. Martínez, y A. E. León, «Effects of *spirulina* biomass on the technological and nutritional quality of bread wheat pasta», *LWT - Food Science and Technology*, vol. 58, n.o 1, pp. 102-108, sep. 2014, doi: 10.1016/j.lwt.2014.02.054.