

**UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



Informe de Investigación

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

Presentado por:

Mg. Jinmer Bravo Apaza

Dr. Anderson Núñez Fernández

Mg. Saul Moreano Carrasco

Dr. Manuel Octavio Fernández Athó

Estudiante Guillermo Rojas Ramos

Abancay, Perú

2025





"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

Abancay, 05 de mayo del 2025

**CARTA N° 0131- 2025-DIIN-VRIN-UNAMBA**

**Señor:**

Mg. Jinmer Bravo Apaza  
GANADOR DEL IV CONCURSO DE DOCENTES 2022

**ASUNTO** : Remito dictamen favorable

**REF.** : CARTA N°29.04.25.CEE-VRIN -UNAMBA

Es grato dirigirme a usted para saludarlo cordialmente y a la vez, remito el dictamen favorable por parte de la comisión evaluadora según Resolución N°019-2025-VRIN-UNAMBA, para su conocimiento y trámites correspondientes.

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente,

  
 **Dr. Eder Marnani Vilca**  
Director de Institutos de Investigación  
UNAMBA

C/c:  
Archivo  
EMV/DIIN  
Asist. Adm./MSYTH



[institutos\\_investigacion@unamba.edu.pe](mailto:institutos_investigacion@unamba.edu.pe)



### **Agradecimientos**

*Deseamos expresar nuestro más profundo agradecimiento a la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, y en especial al Vicerrectorado de Investigación, por el apoyo financiero y logístico brindado para la realización de esta investigación. Su respaldo ha sido fundamental para llevar a cabo este proyecto, permitiendo el desarrollo de conocimientos y contribuyendo al avance científico en el campo del cultivo de espirulina.*



## **Dedicatoria**

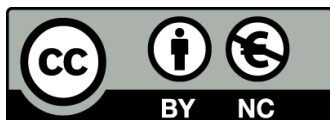
*Dedicamos este trabajo a la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac y al Vicerrectorado de Investigación, por su valioso apoyo financiero y logístico, que hizo posible la realización de esta investigación y el desarrollo científico en el campo del cultivo de espirulina*



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

Línea de investigación: Caracterización, desarrollo de procesos e innovación en la Agroindustria.

Esta publicación está bajo una Licencia Creative Commons



## ÍNDICE

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>RESUMEN</b>	3
<b>ABSTRACT</b>	4
<b>CAPÍTULO I</b>	5
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	5
1.1. Descripción del problema	5
1.2. Enunciado del problema	6
1.2.1. Problema general	6
1.2.2. Problemas específicos	6
1.2.3. Justificación de la investigación	7
<b>CAPÍTULO II</b>	9
<b>OBJETIVOS E HIPÓTESIS</b>	9
2.1. Objetivos de la investigación	9
2.1.1. Objetivo general	9
2.1.2. Objetivos específicos	9
2.2. Hipótesis de la investigación	9
2.2.1. Hipótesis general	9
2.2.2. Hipótesis específicas	10
2.3. Operacionalización de variables	11
<b>CAPÍTULO III</b>	12
<b>MARCO TEÓRICO REFERENCIAL</b>	12
3.1. Antecedentes	12
3.1.1. Antecedentes internacionales	12
3.1.2. Antecedentes nacionales	15
3.2. Marco teórico	17



3.2.1. Características generales de la espirulina ( <i>Arthrospira platensis</i> )	17
3.2.2. Sistemas de cultivo de espirulina	22
3.2.3. Parámetros tecnológicos en el cultivo de espirulina	24
3.2.4. Efectos de los parámetros tecnológicos en el valor nutricional de la espirulina	27
3.2.5. Efectos de los parámetros tecnológicos en el rendimiento del cultivo	28
3.3. Marco conceptual	29
<b>CAPÍTULO IV</b>	<b>31</b>
<b>METODOLOGÍA</b>	<b>31</b>
4.1. Tipo y nivel de investigación	31
4.2. Diseño de la investigación	31
4.3. Descripción ética de la investigación (si corresponde)	33
4.4. Población y muestra (si corresponde)	33
4.5. Procedimiento	34
4.6. Técnica e instrumento	35
4.7. Análisis estadístico (si corresponde)	36
<b>CAPÍTULO V</b>	<b>37</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIONES</b>	<b>37</b>
5.1. Análisis de resultados	37
5.2. Contrastación de hipótesis (si corresponde)	57
5.3. Discusión	60
<b>CAPÍTULO VI</b>	<b>62</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>62</b>
6.1. Conclusiones	62
6.2. Recomendaciones	63
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>64</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>69</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1</b> — Operacionalización de variables	11
<b>Tabla 2</b> — Diseño factorial fraccionado	32
<b>Tabla 3</b> — Estadísticos descriptivos	37
<b>Tabla 4</b> — Análisis de regresión: Biomasa (g/L) vs. Temperatura (°C); velocidad de flujo (m/s); Intensidad lumínica (lux)	43
<b>Tabla 5</b> — Análisis predictivo de Proteína (g/L) mediante regresión múltiple basada en factores operacionales	45
<b>Tabla 6</b> — Análisis predictivo de magnesio (mg/100g) mediante regresión múltiple basada en factores operacionales	47
<b>Tabla 7</b> — Análisis predictivo de magnesio (mg/100g) mediante regresión múltiple basada en factores operacionales	49
<b>Tabla 8</b> — Análisis predictivo de potasio (mg/100g) mediante regresión múltiple basada en factores operacionales	51
<b>Tabla 9</b> — Análisis predictivo de calcio (mg/100g) mediante regresión múltiple basada en factores operacionales	53
<b>Tabla 10</b> — Análisis predictivo de hierro (mg/100g) mediante regresión múltiple basada en factores operacionales	55
<b>Tabla 11</b> — Efecto sobre la Biomasa (g/L)	58
<b>Tabla 12</b> — Efecto sobre la Proteína (g/100g)	59
<b>Tabla 13</b> — Efecto sobre Minerales (mg/100g)	59



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1</b> — Prueba de normalidad para biomasa	38
<b>Figura 2</b> — Prueba de normalidad para proteína	39
<b>Figura 3</b> — Prueba de normalidad para magnesio	39
<b>Figura 4</b> — Prueba de normalidad para fosforo	40
<b>Figura 5</b> — Prueba de normalidad para potasio	41
<b>Figura 6</b> — Prueba de normalidad para calcio	42
<b>Grafica 7</b> — Prueba de normalidad para hierro	42
<b>Figura 8</b> — Diagrama de Pareto de efectos en Biomasa (g/l) $\alpha = 0.05$	44
<b>Figura 9</b> — Grafica de efectos principales para biomasa (g/l)	44
<b>Figura 10</b> — Diagrama de Pareto de efectos en Proteína (g/100l) $\alpha = 0.05$	46
<b>Figura 11</b> — Grafica de efectos principales para proteína (g/100g) $\alpha = 0.05$	46
<b>Figura 12</b> — Diagrama de Pareto de efectos en magnesio (mg/100g) $\alpha=0.05$	48
<b>Figura 13</b> — Gráfica de efectos principales para magnesio (mg/100g)	48
<b>Figura 14</b> — Diagrama de Pareto de efectos para fosforo (mg/100g) $\alpha= 0.05$	50
<b>Figura 15</b> — Gráfica de efectos principales para fosforo (mg/100g)	50
<b>Figura 16</b> — Diagrama de Pareto de efectos para potasio (mg/100g) $\alpha= 0.05$	52
<b>Figura 17</b> — Gráfica de efectos principales para potasio (mg/100g)	52
<b>Figura 18</b> — Diagrama de Pareto de efectos para calcio (mg/100g) $\alpha = 0.05$	54
<b>Figura 19</b> — Gráfica de efectos principales para calcio (mg/100g)	54
<b>Figura 20</b> — Diagrama de Pareto para hierro (mg/100g) $\alpha = 0.05$	56
<b>Figura 21</b> — Gráfica de efectos principales para hierro (mg/100g)	56



## INTRODUCCIÓN

La espirulina (*Arthrospira platensis*) es una microalga de alto valor nutricional y comercial, reconocida por su rica composición en proteínas, vitaminas, minerales y antioxidantes. Su cultivo se ha expandido significativamente en las últimas décadas, impulsado por la demanda en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética. Además, su capacidad de crecimiento en condiciones extremas y su eficiencia en la conversión de luz solar en biomasa la convierten en un organismo ideal para la producción sostenible de alimentos y suplementos.

El cultivo de espirulina en canales abiertos se ha consolidado como una de las técnicas más utilizadas debido a su bajo costo y facilidad de implementación a gran escala. Sin embargo, este método presenta desafíos significativos relacionados con la optimización de los parámetros tecnológicos, que son cruciales para maximizar el crecimiento y la productividad de la microalga. Factores como la velocidad de flujo del medio de cultivo, la intensidad lumínica y la temperatura juegan un papel determinante en el desarrollo de la espirulina, afectando su tasa de crecimiento, la calidad de la biomasa producida y la eficiencia del proceso.

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo principal analizar la influencia de estos parámetros tecnológicos en el crecimiento del cultivo continuo de espirulina en canales abiertos. Entender cómo interactúan estos factores permitirá no solo mejorar la productividad, sino también optimizar el uso de recursos, como la energía y los nutrientes, contribuyendo así a la sostenibilidad del proceso.

El estudio se centra en la identificación de las condiciones óptimas para el cultivo de espirulina, mediante un diseño experimental que considera diferentes niveles de velocidad de flujo, intensidad lumínica y temperatura. A partir de estos experimentos, se pretende desarrollar un modelo que permita predecir el comportamiento del cultivo bajo diversas condiciones, facilitando la implementación de estrategias que maximicen la eficiencia del proceso.

La importancia de esta investigación radica en su potencial para contribuir al desarrollo de tecnologías de cultivo más eficientes y sostenibles, que puedan ser aplicadas tanto en entornos industriales como en proyectos de producción local. Asimismo, los resultados obtenidos pueden servir como base para futuras investigaciones que exploren nuevas aplicaciones y mejoras en el cultivo de microalgas, alineadas con los desafíos globales de seguridad alimentaria y sostenibilidad ambiental.



Además, este trabajo busca avanzar en el conocimiento sobre los factores tecnológicos que afectan el cultivo de espirulina en canales abiertos, proporcionando soluciones prácticas que impulsen la producción de este valioso recurso natural, con un enfoque en la sostenibilidad y la eficiencia.



## RESUMEN

El cultivo de espirulina se ha convertido en una actividad clave debido a su alto valor nutricional, siendo una fuente rica en proteínas, vitaminas, minerales y antioxidantes, lo que la hace ideal para la industria alimentaria y nutracéutica. En este estudio, se evaluó el impacto de los parámetros tecnológicos en el crecimiento y productividad de *Arthrospira platensis* en cultivos continuos dentro de canales abiertos, analizando temperatura, velocidad de flujo e intensidad lumínica como factores determinantes en la biomasa y su perfil nutricional. Para ello, se aplicó un diseño experimental factorial fraccionado ( $2^{k-1}$ ) con cuatro tratamientos y tres réplicas, operando en un entorno semicontrolado. Los resultados estadísticos (ANOVA y regresión múltiple) identificaron a la temperatura como el factor más influyente en la producción de biomasa ( $F=4147.36$ ,  $p=0.000$ ), contenido proteico ( $F=70.43$ ,  $p=0.000$ ) y concentración de minerales esenciales como magnesio, fósforo, potasio, calcio y hierro. Un aumento de la temperatura de 18°C a 28°C incrementó la biomasa de 0.65 g/L a 0.85 g/L, mejorando también la concentración proteica. Además, la velocidad de flujo tuvo un impacto significativo en la biomasa ( $F=1324.96$ ,  $p=0.000$ ), favoreciendo la homogeneidad del cultivo y optimizando la absorción de nutrientes al incrementarse de 0.15 a 0.30 m/s. En contraste, la intensidad lumínica superior a 20,000 lux mostró un efecto negativo, disminuyendo la biomasa y afectando la calidad proteica. Estos hallazgos subrayan la importancia de optimizar la temperatura y la velocidad de flujo para mejorar la productividad del cultivo de espirulina en sistemas abiertos, mientras que la intensidad lumínica debe regularse para evitar efectos adversos. Los resultados obtenidos impulsan el desarrollo de sistemas de producción más eficientes y sostenibles, en concordancia con la creciente demanda industrial de biomasa de alta calidad.

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



## ABSTRACT

Spirulina cultivation has become a key activity due to its high nutritional value, being a rich source of proteins, vitamins, minerals, and antioxidants, making it ideal for the food and nutraceutical industries. This study evaluated the impact of technological parameters on the growth and productivity of *Arthrospira platensis* in continuous cultivation within open channels, analyzing temperature, flow velocity, and light intensity as determining factors in biomass production and nutritional profile. A fractional factorial experimental design ( $2^{k-1}$ ) was applied with four treatments and three replicates, operating in a semi-controlled environment. Statistical results (ANOVA and multiple regression analysis) identified temperature as the most influential factor in biomass production ( $F=4147.36$ ,  $p=0.000$ ), protein content ( $F=70.43$ ,  $p=0.000$ ), and the concentration of essential minerals such as magnesium, phosphorus, potassium, calcium, and iron. An increase in temperature from 18°C to 28°C enhanced biomass production from 0.65 g/L to 0.85 g/L, also improving protein concentration. Additionally, flow velocity had a significant impact on biomass ( $F=1324.96$ ,  $p=0.000$ ), promoting culture homogeneity and optimizing nutrient absorption when increased from 0.15 to 0.30 m/s. In contrast, light intensity above 20,000 lux exhibited a negative effect, reducing biomass and affecting protein quality. These findings emphasize the importance of optimizing temperature and flow velocity to enhance spirulina productivity in open cultivation systems, while light intensity should be regulated to avoid adverse effects. The results obtained drive the development of more efficient and sustainable production systems, aligned with the growing industrial demand for high-quality biomass.

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



## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1 Descripción del problema

El cultivo de espirulina (*Arthrospira platensis*) en canales abiertos es una estrategia biotecnológica de bajo costo con un gran potencial de escalabilidad, ampliamente utilizada en la producción de biomasa para la industria alimentaria, farmacéutica y nutracéutica. Su eficiencia radica en la capacidad de generar grandes volúmenes de biomasa en condiciones ambientales controladas, permitiendo una producción sostenible y económicamente viable. Sin embargo, la productividad y calidad del cultivo no dependen únicamente de la disponibilidad de nutrientes, sino también de una serie de parámetros tecnológicos clave, tales como la velocidad de flujo del medio de cultivo, la intensidad lumínica y la temperatura. Estos factores tienen una influencia directa sobre la tasa de crecimiento, la eficiencia fotosintética, la distribución de nutrientes y la regulación metabólica de la espirulina, impactando así la calidad del producto final, su perfil nutricional y la rentabilidad del proceso (Torzillo, Vonshak 2013).

El flujo del medio de cultivo es un parámetro crítico que evita el estancamiento, mejora la homogeneidad del cultivo y promueve una mejor absorción de nutrientes y gases, como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), esencial para la fotosíntesis. Una velocidad de flujo inadecuada puede generar zonas de baja oxigenación, reduciendo la productividad y favoreciendo la acumulación de subproductos no deseados. Por otro lado, la temperatura es un factor determinante en el metabolismo celular de *Arthrospira platensis*, ya que influye en la síntesis de proteínas, lípidos y pigmentos bioactivos como la ficocianina. Fluctuaciones fuera del rango óptimo pueden ralentizar el crecimiento o, en condiciones extremas, inducir estrés celular y mortalidad. Asimismo, la intensidad lumínica juega un papel fundamental en la

eficiencia fotosintética, siendo necesaria para la producción de biomasa, pero a niveles excesivos puede provocar fotoinhibición, afectando negativamente la viabilidad celular y la composición bioquímica de la espirulina (Richmond Amos 2004).

A pesar de la importancia de estos parámetros, la interacción entre ellos y su impacto conjunto en el cultivo continuo de espirulina en canales abiertos aún no ha sido completamente comprendida. La falta de información detallada sobre cómo optimizar estas variables limita el desarrollo de estrategias eficientes para la producción industrial, impidiendo el máximo aprovechamiento del potencial de *Arthrospira platensis* como fuente sostenible de proteínas, antioxidantes y compuestos bioactivos. En este sentido, la presente investigación busca reducir esta brecha en el conocimiento, evaluando la influencia de estos factores tecnológicos y proponiendo estrategias óptimas para mejorar el rendimiento, la estabilidad del cultivo y la sostenibilidad del proceso. Mediante un análisis integral basado en diseño experimental y modelado estadístico, se pretende desarrollar un modelo de cultivo optimizado, capaz de maximizar la producción de biomasa y mejorar la calidad nutricional de la espirulina en sistemas de canales abiertos. Este enfoque permitirá avanzar hacia una producción más eficiente, rentable y ambientalmente sostenible, alineada con la creciente demanda global de fuentes alternativas de proteínas y suplementos naturales de alto valor biotecnológico (Sirikulrat, Pekkoh, Pumas 2021).

## 1.2 Enunciado del problema

### 1.2.1 Problema general

¿De qué manera influye los parámetros tecnológicos en el crecimiento del cultivo continuo de espirulina (*Arthrospira platensis*) en canales abiertos, para maximizar la biomasa y calidad nutricional?

### 1.2.2 Problemas específicos

Los Problemas específicos son:

- ¿Cómo influye la temperatura en la producción de biomasa y calidad nutricional (proteína y minerales) del cultivo de espirulina (*Arthrospira platensis*) en canales abiertos?



- ¿De qué manera influye la velocidad de flujo en producción de biomasa y calidad nutricional (proteína y minerales) del cultivo de espirulina (*Arthrospira platensis*) en canales abiertos?
- ¿Cómo influye la intensidad lumínica en la producción de biomasa y calidad nutricional (proteína y minerales) del cultivo de espirulina (*Arthrospira platensis*) en canales abiertos?

### 1.2.3 Justificación de la investigación

El cultivo continuo de espirulina (*Arthrospira platensis*) en canales abiertos representa una técnica biotecnológica de gran potencial para la producción masiva de biomasa con múltiples aplicaciones en los sectores alimentario, cosmético y ambiental. Sin embargo, para alcanzar niveles óptimos de productividad y sostenibilidad, es imprescindible entender cómo los parámetros tecnológicos influyen en el crecimiento, la calidad nutricional y los costos de producción. La capacidad de la espirulina para fijar dióxido de carbono y transformar este gas en compuestos bioactivos como proteínas, ficocianina y lípidos la convierte en un recurso estratégico frente a los desafíos globales relacionados con la seguridad alimentaria y el cambio climático. En este contexto, la investigación busca optimizar estos parámetros para maximizar la eficiencia del proceso.

La calidad nutricional de la biomasa de espirulina está directamente vinculada a factores como la temperatura, velocidad de flujo e intensidad lumínica, que afectan su metabolismo celular y la acumulación de compuestos de interés comercial. Una biomasa rica en proteínas y antioxidantes como la ficocianina no solo es valiosa como suplemento alimenticio, sino que también tiene aplicaciones en la industria farmacéutica y como biofertilizante. Comprender cómo ajustar estos parámetros puede asegurar un producto final consistente y de alto valor agregado, alineado con las demandas de calidad del mercado.

El rendimiento del cultivo es otro aspecto crucial, donde factores como la temperatura, la velocidad de flujo del medio de cultivo e intensidad lumínica, así como la distribución de nutrientes influyen directamente en la productividad medida en biomasa por unidad de superficie o volumen. Una temperatura óptima o una inadecuada mezcla del medio pueden limitar el crecimiento de la espirulina, mientras que la optimización de estas variables puede incrementar



significativamente la producción. Esto no solo mejora la eficiencia del sistema, sino que también reduce el tiempo necesario para obtener biomasa, lo que es crítico en aplicaciones industriales.

En este sentido, la investigación es esencial para abordar los desafíos técnicos que limitan la productividad y la calidad del cultivo de espirulina. Su enfoque no solo mejorará los rendimientos, sino que también contribuirá al desarrollo de sistemas de producción sostenibles, alineados con las necesidades globales de mitigación de emisiones de carbono y la generación de recursos biológicos de alto valor nutricional.



## CAPÍTULO II

### OBJETIVOS E HIPÓTESIS

#### 2.1 Objetivos de la investigación

##### 2.1.1 Objetivo general

Determinar la influencia de los parámetros tecnológicos en el crecimiento del cultivo continuo de espirulina (*Arthrospira platensis*) en canales abiertos, para maximizar la biomasa y calidad nutricional.

##### 2.1.2 Objetivos específicos

- Evaluar la influencia de la temperatura sobre la producción de biomasa y la calidad nutricional (proteínas y minerales) del cultivo continuo de espirulina (*Arthrospira platensis*) en canales abiertos.
- Analizar la influencia de la velocidad de flujo en la producción de biomasa y la calidad nutricional (proteínas y minerales) del cultivo continuo de espirulina (*Arthrospira platensis*) en canales abiertos.
- Evaluar la influencia de la intensidad lumínica en la producción de biomasa y la calidad nutricional (proteínas y minerales) del cultivo continuo de espirulina (*Arthrospira platensis*) en canales abiertos.

#### 2.2 Hipótesis de la investigación

##### 2.2.1 Hipótesis general

Los parámetros tecnológicos influyen significativamente en el crecimiento del cultivo continuo de espirulina (*Arthrospira platensis*) en canales abiertos y maximizan la biomasa y calidad nutricional.



### 2.2.2 Hipótesis específicas

- La temperatura influye significativamente en la producción de biomasa y la calidad nutricional (proteínas y minerales) del cultivo continuo de espirulina (*Arthrospira platensis*) en canales abiertos.
- La velocidad de flujo influye significativamente en la producción de biomasa y la calidad nutricional (proteínas y minerales) del cultivo continuo de espirulina (*Arthrospira platensis*) en canales abiertos.
- La intensidad lumínica influye significativamente en la producción de biomasa y la calidad nutricional (proteínas y minerales) del cultivo continuo de espirulina (*Arthrospira platensis*) en canales abiertos.



### 2.3 Operacionalización de variables

Las variables independientes y dependientes se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 1 — Operacionalización de variables**

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA/UNIDAD	INSTRUMENTO
Variable Independiente  <b>Parámetros tecnológicos</b>	Parámetros tecnológicos clave que afectan el crecimiento continuo de espirulina, como temperatura, velocidad de flujo e intensidad lumínica (M. Ahsan B. Habib, Mashuda Parvin, Tim C. Huntington, Mohammad R. Hasan 2008).	Medición y control de los parámetros tecnológicos en el cultivo para evaluar su influencia en la producción.	Temperatura	Ambiente (18)	°C	Multiparámetro
				Controlado (28)	°C	Multiparámetro
			Velocidad de flujo	0.15	m/s	Flotador
				0.30	m/s	Flotador
			Intensidad lumínica	5,000.00	Lux	Luxómetro
				20,000.00	Lux	Luxómetro
Variable Dependiente  <b>Crecimiento del cultivo continuo de espirulina (<i>Arthrospira platensis</i>)</b>	Crecimiento del cultivo continuo de espirulina medido por biomasa, productividad y calidad nutricional de la biomasa producida (Lukavský 2000).	Evaluar la biomasa producida y analizar su contenido nutricional y rendimiento bajo diferentes parámetros.	Rendimiento	Biomasa	g/l	$Mf = \frac{Psm (g)}{Vol. m (L)}$
			Calidad nutricional	Proteínas	g/100g.	Laboratorio Acreditado por INACAL La Molina calidad total - UNALM
				Grasa	g/100g	
				Ceniza	g/100g	
				Magnesio	Ppm	
				Fosforo	Ppm	
				Potasio	Ppm	
				Calcio	Ppm	
			Fierro	Ppm		

\*Mf: Biomasa final en gramos (peso seco) \* Psm.: Peso seco de muestra en gramos \* Vol. m.: Volumen de muestra en litros.

## CAPÍTULO III

### MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

#### 3.1 Antecedentes

##### 3.1.1 Antecedentes internacionales

Según Guidi et al. (2021), El cultivo de microalgas, como *Arthrospira platensis*, se ha destacado como una alternativa prometedora a la agricultura tradicional en áreas áridas y semiáridas. Un estudio realizado en Gran Canaria evaluó la viabilidad del cultivo a largo plazo de esta microalga en un sistema de canal abierto bajo invernadero. Se determinó una productividad máxima de 0.08 g/L/día, con una concentración óptima de entre 0.6 y 0.9 g/L. Durante 26 días de cultivo, al reutilizar el medio de cultivo, se logró una productividad estable de 0.06 g/L/día (6.0 g/m<sup>2</sup>/día), manteniendo una composición bioquímica constante de la biomasa. Las condiciones ambientales exteriores variaron entre 17.9 y 30.7 °C de temperatura y una irradiación solar de 79.2 a 274.8 W/m<sup>2</sup>. Los niveles de pH y salinidad se mantuvieron en rangos de 9.42 a 10.77 y 11.2 a 14.9 g/L, respectivamente. La biomasa obtenida tuvo un contenido proteico superior al 60 %, con niveles altos de potasio (1.8 g/100 g) y ficocianina (7.2 %), lo que la hace adecuada para la producción de alimentos y la extracción de pigmentos naturales. Además, cumplió con los estándares internacionales de consumo humano debido a su bajo contenido en metales pesados y la ausencia de patógenos. Estos resultados refuerzan el potencial de una bioeconomía basada en microalgas en las Islas Canarias.

Menciona Chotchindakun et al. (2024), que el uso de medios de cultivo sintéticos, como el medio Zarrouk (ZM), es común en la producción industrial de *Arthrospira*, pero plantea preocupaciones debido al alto costo y el impacto ambiental de los fertilizantes químicos. En este estudio, se desarrolló un sistema de cultivo de *Arthrospira platensis* H53 en laboratorio utilizando un medio de compost orgánico (OCM), diseñado para imitar las condiciones naturales y promover interacciones microbianas. En comparación con ZM, el



crecimiento de *A. platensis* fue mayor en OCM, con una tasa de crecimiento específica de  $0.20 \text{ día}^{-1}$  frente a  $0.17 \text{ día}^{-1}$  en ZM. Además, la eficiencia en el uso de nutrientes (NUE) mejoró significativamente, con una mayor utilización de nitratos y fosfatos. El análisis microbiano reveló la presencia de bacterias promotoras del crecimiento, lo que sugiere una interacción simbiótica que potencia la productividad en este entorno.

El investigador Mehar et al. (2019), menciona que el control del pH es un factor crucial en el cultivo de *Spirulina*, ya que influye directamente en el crecimiento celular, la fijación de  $\text{CO}_2$  y la prevención de contaminaciones. En un estudio piloto, se utilizó un sistema automatizado que proporcionaba  $\text{CO}_2$  como fuente de carbono y regulador de pH en el cultivo de *Spirulina*. Se evaluaron diferentes niveles de pH (7.5, 8.5 y 9.5), y el pH 8.5 resultó ser el óptimo, con una productividad de biomasa de  $72 \text{ mg L}^{-1} \text{ día}^{-1}$ , una tasa de biofijación de  $\text{CO}_2$  de  $0.13 \text{ g L}^{-1} \text{ día}^{-1}$ , y un contenido de proteínas y ficocianina de 64% y 14%, respectivamente. Aunque el cultivo a pH 9.5 mostró un retraso en la alimentación de  $\text{CO}_2$ , los resultados metabólicos fueron comparables a los del pH 8.5. Este sistema automatizado de control de pH y suministro de  $\text{CO}_2$  puede mejorar el rendimiento de los cultivos de *Spirulina* u otras microalgas.

El investigador Torzillo et al. (2021), indica que los productos derivados de microalgas han ganado terreno en industrias como la cosmética, los nutracéuticos y los alimentos funcionales, con la posibilidad de desarrollar nuevos productos de alto valor. Un capítulo reciente revisa los efectos de los factores ambientales clave sobre la productividad y la composición bioquímica de la biomasa microalgal. Se resalta que la saturación de luz es uno de los principales obstáculos para aprovechar al máximo el potencial fotosintético de las microalgas. Otros factores ambientales limitantes incluyen las temperaturas subóptimas y supraóptimas, que, combinadas con otros factores, pueden amplificar los efectos negativos sobre la productividad. La mejora de la utilización de la luz mediante un aumento en la tasa de mezcla y la posibilidad de aprovechar la luz intermitente se discuten en relación con los sistemas de cultivo. Además, para cualquier sistema de producción, es esencial cumplir con



las normativas de la industria alimentaria, lo que incluye el uso de materiales, sistemas y protocolos aprobados.

Shah et al. (2024), indica que la creciente demanda de alimentos y nutrientes debido al aumento de la población y la industrialización ha generado desafíos en los ámbitos alimentario, ambiental y económico. Entre las soluciones innovadoras propuestas para enfrentar estas problemáticas se destaca el uso de "alimentos azules", donde la Spirulina juega un papel clave. Esta microalga rica en nutrientes, con su rápido crecimiento y versatilidad, se presenta como una alternativa ecológica y económica que contribuye a la sostenibilidad alimentaria y la neutralidad de carbono. Su alto contenido de vitaminas, minerales, ácidos grasos esenciales y aminoácidos la convierten en un suplemento valioso tanto para la nutrición humana como para la alimentación en acuicultura y ganado. Además, se explora su potencial terapéutico para la prevención de enfermedades y la promoción de la vitalidad, con la expectativa de reemplazar compuestos sintéticos o de origen vegetal en diversas aplicaciones. Se recomienda el uso de enfoques multi-ómicos para comprender mejor el potencial nutricional y terapéutico de la Spirulina.

Según Costa et al. (2019), el concepto de una biorrefinería basada en Spirulina ha sido ampliamente estudiado desde perspectivas operacionales y económicas. El género Spirulina (*Arthrospira*) es de gran importancia comercial debido a su alto contenido de proteínas y pigmentos como la ficocianina, además de su capacidad para mitigar gases de efecto invernadero y tratar efluentes. Spirulina representa más del 30% de la biomasa producida globalmente, y se utiliza en alimentos, cosméticos, biofertilizantes, biocombustibles y biomateriales. La viabilidad económica de la producción de biomasa de Spirulina depende de varios factores, incluyendo la preparación del medio de cultivo, las condiciones climáticas, los sistemas de reactores abiertos o cerrados, y el procesamiento de la biomasa. Los sistemas abiertos, como los reactores tipo Raceway, son populares debido a sus menores costos de construcción y operación en comparación con los sistemas cerrados. Además, la recirculación del agua y los nutrientes reduce significativamente los costos, mientras que la integración de fuentes de energía renovables como biogás o energía solar puede mejorar la



viabilidad económica. En términos de procesamiento, la recuperación de biomasa se puede lograr a través de filtración, y la etapa de secado suele realizarse mediante secadores en spray, lo que contribuye a un menor costo de producción de la biomasa.

### 3.1.2 Antecedentes nacionales

En la tesis de Laura Huamán (2021), titulada “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 CO<sub>2</sub> atmosférico”, desarrollada en la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, se abordó la capacidad de las microalgas, como la Spirulina, para absorber el dióxido de carbono atmosférico y transformarlo en biomasa rica en proteínas, lípidos y carbohidratos. La investigación se centró en optimizar los parámetros de cultivo para maximizar la producción de biomasa. Entre los factores clave identificados estuvieron la temperatura, el fotoperiodo, la intensidad de luz y la inyección de CO<sub>2</sub> puro. Mediante un modelo matemático de segundo orden, la autora determinó que la mayor producción de biomasa se lograba a 24°C y con una intensidad lumínica de 3240 lúmenes utilizando luz LED blanca. El modelo fue validado experimentalmente, mostrando que no existía diferencia significativa entre los resultados experimentales y los valores predichos por el modelo ( $p > 0.05$ ). Además, la biomasa óptima obtenida presentó un contenido proteico del 50.44%. Este antecedente resulta relevante para investigaciones centradas en la optimización de cultivos de Spirulina como solución sostenible para la fijación de CO<sub>2</sub> y la producción de biomasa de alto valor nutricional.

Un estudio llevado a cabo en Perú por Ronald Huarachi et al. (2013), investigó la producción de la cianofita Spirulina *platensis* en un fotobiorreactor tubular cónico bajo condiciones controladas de laboratorio. El fotobiorreactor, diseñado específicamente para esta investigación, tenía una capacidad total de 4,085 litros y fue construido utilizando una manguera de PVC de 47 metros de longitud, con un intercambiador de calor y refuerzos de metal, forrado con papel aluminio para optimizar la eficiencia de la luz. El sistema de iluminación consistía en una lámpara de vapor de mercurio, que proporcionaba 12 horas de



luz y 12 horas de oscuridad, alcanzando una intensidad lumínica de 5617,23 lux. La operación del fotobiorreactor incluyó una bomba de aire con un caudal de 0,021 L/s, lo que permitió alcanzar una tasa de producción de biomasa seca de 3,362 g/m<sup>2</sup> y una concentración de clorofila “a” de 0,05658 mg/L. El crecimiento de *S. platensis* en este sistema se ajustó a un modelo de curva de crecimiento en forma de "S", con un R<sup>2</sup> de 0,865 en un periodo de 22 días, demostrando la viabilidad del uso de fotobiorreactores tubulares para la producción de microalgas en condiciones controladas.

En un estudio llevado a cabo en Perú por Vasquez-Villalobos et al. (2010), se evaluó la influencia de la proporción de agua de mar y la concentración de bicarbonato en la producción de biomasa de *Spirulina* sp. utilizando un Diseño Compuesto Central Rotacional (DCCR). Se analizaron variables clave como la producción de biomasa ( $\phi$ ), la fase de adaptación ( $\lambda$ ), la velocidad específica de crecimiento ( $\mu$ ) y el tiempo de generación (G), empleando el modelo matemático de Gompertz. Los resultados indicaron que el mayor valor de biomasa ( $\phi$ : log N/N<sub>0</sub>: 0,928) se obtuvo en 168,8 horas, en un medio con pH de 8,8, temperatura de 25°C, salinidad de 1,2% y una concentración de bicarbonato de 1,6 g/L. Por otro lado, el menor valor de  $\phi$  (0,45) se observó en repeticiones del punto central con una salinidad de 0,7% y 3,0 g/L de bicarbonato, demostrando la importancia de la salinidad en relación con el bicarbonato en la producción de biomasa de *Spirulina*. El estudio también utilizó iluminación de 2,7 klx mediante un Diodo Emisor de Luz Blanca (DELB) durante 12 horas continuas, junto con una inyección de aire de 0,86 L/s por fotobiorreactor de 200 mL de capacidad. Solo los valores de  $\phi$  se ajustaron adecuadamente al modelo cuadrático de Superficie de Respuesta, con un R<sup>2</sup> de 0,99 y un error absoluto medio de 2,4%, lo que destaca la precisión del modelo para predecir la producción óptima de biomasa.

Un estudio realizado en la Universidad Pedro Ruíz Gallo en Lambayeque, Perú, por Barreto González et al. (2021), tuvo como objetivo cultivar *Spirulina platensis* y determinar el pH óptimo para maximizar el crecimiento poblacional y el rendimiento de proteínas bajo condiciones de laboratorio. Para ello, se utilizó un diseño experimental clásico con un grupo control y dos tratamientos



experimentales, cada uno con tres repeticiones. El experimento se llevó a cabo durante 14 días en frascos de vidrio de un litro de capacidad. El crecimiento poblacional se monitoreó diariamente mediante recuento celular utilizando una cámara de Malassez, y los datos fueron analizados mediante Análisis de Varianza y la Prueba de Tukey para evaluar el efecto de diferentes niveles de pH. Los resultados mostraron que la *Spirulina platensis* fue capaz de crecer en ambos niveles de pH evaluados, pero el mejor crecimiento poblacional y la mayor producción de proteínas se observaron en el tratamiento con un pH de 9, alcanzando una tasa de crecimiento significativamente superior en comparación con el tratamiento a pH 10. Además, el contenido de proteínas fue mayor en el tratamiento con pH 9, logrando un 60.72% de proteínas. Este hallazgo destaca la importancia de ajustar el pH para optimizar el rendimiento en el cultivo de *Spirulina* bajo condiciones controladas.

## 3.2 Marco teórico

### 3.2.1 Características generales de la espirulina (*Arthrospira platensis*)

La espirulina, una cianobacteria microscópica y filamentosa, es ampliamente reconocida como un alimento funcional seguro y producido comercialmente en estanques al aire libre bajo condiciones controladas. Sus beneficios para la salud están relacionados con su rica composición química, que incluye proteínas, carbohidratos, aminoácidos esenciales, minerales (especialmente hierro), ácidos grasos esenciales, vitaminas y pigmentos. Componentes bioactivos como la ficocianina, los polisacáridos sulfatados y el ácido  $\gamma$ -linolénico desempeñan roles clave en la mejora de funciones corporales (Wan, Wu, Kuča 2021).

La espirulina es una materia prima prometedora para la producción de ficocianina, un pigmento azul con alto valor comercial por su color brillante, biodisponibilidad y propiedades terapéuticas. La mejora en la síntesis de ficocianina no solo incrementaría la sostenibilidad, sino también la viabilidad económica de su producción. Factores como la fuente de iluminación desempeñan un papel crucial, y estrategias como el uso de concentradores solares luminiscentes y láminas de filtrado de luz, que optimizan los espectros de longitud de onda, han demostrado ser prometedoras para potenciar su



síntesis en sistemas como estanques abiertos e invernaderos. No obstante, la implementación a gran escala requiere evaluaciones tecno económicas y pruebas de escalabilidad para asegurar su viabilidad práctica (Thevarajah, Piyatilleke, Nimarshana, Koushalya, Malik y Ariyadasa 2024). Además, la espirulina se presenta como un candidato prometedor para la producción de bio compuestos gracias a su rápido crecimiento, alto contenido proteico y naturaleza ecológica. Sus propiedades, como la resistencia mecánica y la biodegradabilidad, ofrecen ventajas significativas frente a otros biomateriales como el ácido poliláctico (PLA) y la celulosa, aunque su escalabilidad y aplicación comercial aún representan desafíos. Técnicas como el moldeo por inyección, el casting por solvente y el mezclado se han utilizado para producir bio compuestos (Kothawale, Varma, y Kandasubramanian 2024).

Hasta mediados del siglo XX, la espirulina no se consideraba una opción alimentaria con futuro. Su producción industrial, aunque relativamente reciente, enfrenta desafíos como los altos costos, el complejo control de procesos, y problemas como depredadores de algas e impactos ambientales. A pesar de ello, su uso comercial es una realidad, destacándose como aditivo en alimentos enriquecidos o colorantes naturales. Además, aunque su principal aplicación sigue siendo la alimentación, las investigaciones buscan ampliar su uso hacia la promoción de la salud, con estudios que sugieren beneficios en la prevención del síndrome metabólico. Sin embargo, la baja capacidad productiva y los costos siguen siendo barreras importantes (Villaró-Cos, Guzmán Sánchez, Acién, Lafarga 2024).

La espirulina contiene mayor contenido de proteínas y cenizas, esta biomasa demostró un notable potencial como ingredientes funcionales en la industria alimentaria, gracias a sus propiedades y versatilidad para desarrollar productos de valor agregado (Ladjal-Ettoumi, Hamadi, Hadjer Douik, Cherifi, Nazir 2024). Por otra parte, la espirulina (*Arthrospira spp.*) destaca por su valiosa composición nutricional, siendo una fuente rica en proteínas completas, vitaminas, minerales, ácidos grasos esenciales y fitoquímicos con potentes propiedades antioxidantes. Estos componentes promueven beneficios para la salud, como actividades antioxidantes, antiinflamatorias, antialérgicas y



antivirales (Jakubczyk, Melkis, Dalewski, Janda-Milczarek 2024). Además, la composición y los nutrientes esenciales de la harina de cianobacterias derivada de espirulina (*Arthrospira platensis*) fermentada a pequeña escala con levadura. Se compararon las características de la espirulina fermentada y no fermentada, analizando aminoácidos, compuestos orgánicos volátiles, composición aproximada y estructura mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Los resultados indicaron que la fermentación incrementó significativamente los niveles de aminoácidos totales y esenciales, modificando los perfiles de aminoácidos y ácidos grasos, lo que mejora el valor nutricional de la espirulina (Prasetyo, Khaerunnisa, Volkandari, Yano, Shidiq, Haryanto, Fitrianto, Hanim, Sugiharto 2024).

Los alimentos funcionales contienen compuestos bioactivos no tóxicos que aportan beneficios adicionales a la salud más allá de su valor nutricional. En este contexto, la espirulina, una cianobacteria ampliamente distribuida en América del Sur, destaca por su rica composición de aminoácidos esenciales, ácidos grasos insaturados y compuestos bioactivos como clorofilas, carotenoides, ficocianinas y compuestos fenólicos, que la hacen valiosa tanto como fuente proteica en dietas libres de productos animales como por sus propiedades antioxidantes y su uso como colorante natural. Este artículo de revisión aborda las actividades biológicas de la espirulina, incluyendo sus efectos anticancerígenos, neuroprotectores, probióticos, antiinflamatorios y estimulantes del sistema inmunológico, además de su composición, potencial en alimentos funcionales y tecnologías emergentes para su aplicación (Bortolini, Maciel, Fernandes, Pedro, Rubio, Branco, Haminiuk 2022). Además, la utilidad de la espirulina hidrolizada es beneficiosa en diversas formulaciones de alimentos funcionales (ácidos y alcalinos), así como en alimentos procesados y cocinados (Akbarbaglu, Ayaseh, Ghanbarzadeh, Sarabandi 2022).

La *Spirulina platensis* se comercializa exitosamente como ingrediente en alimentos funcionales, alimento para animales y medicina debido a su riqueza en proteínas, betacaroteno, vitaminas y minerales. su desempeño ambiental, desde la producción hasta el producto final, comparándola con alimentos



tradicionales. Los resultados mostraron que la etapa de cultivo tiene el mayor impacto ambiental, debido al uso intensivo de productos químicos, nutrientes y energía, causando efectos en el cambio climático, la eutrofización y la acidificación. la producción de proteínas a partir de tabletas de espirulina genera mayores impactos que los cultivos terrestres, estos son menores en comparación con las proteínas de origen animal. Se debe desarrollar procesos más sostenibles en la producción de alimentos a base de microalgas (Ye, Mu, Horowitz, Xue, Chen, Xue, Zhou, Klutts, Zhou 2018).

El cultivo de algas es una estrategia prometedora y sostenible para satisfacer demandas en diversos sectores, aunque su implementación depende de métodos efectivos de cultivo y cosecha. Este estudio revisa de manera integral las técnicas contemporáneas, incluyendo estanques abiertos, fotobiorreactores cerrados y estanques tipo raceway, analizando sus ventajas, limitaciones y potencial de expansión con un enfoque en la sostenibilidad. También se abordan procesos clave de cosecha, como separación celular, deshidratación y extracción de biomasa, comparando métodos tradicionales (centrifugación, filtración, sedimentación) con técnicas más sostenibles como floculación, electrocoagulación y filtración por membrana. Se evalúan los impactos ambientales relacionados con el uso de agua, energía, tierra y emisiones de CO<sub>2</sub>, así como las contribuciones de las algas a la sostenibilidad mediante estudios de Análisis del Ciclo de Vida (ACV). La revisión concluye identificando áreas clave para investigaciones futuras, sirviendo como una guía esencial para promover tecnologías sostenibles basadas en algas.

La espirulina, es una cianobacteria ampliamente utilizada en la industria alimentaria y farmacéutica, ha sido objeto de numerosos estudios taxonómicos debido a su clasificación incierta. Tradicionalmente, se ha agrupado bajo el género *Spirulina*, pero estudios más recientes han demostrado que la clasificación correcta la sitúa dentro del género *Arthrospira*, debido a diferencias estructurales y genéticas. Según Sinetova et al. (2024), las especies comúnmente denominadas *Spirulina* pertenecen en realidad a tres géneros: *Spirulina*, *Arthrospira* y *Limnospira*, lo que evidencia la necesidad de una revisión taxonómica más precisa para evitar confusiones en su



comercialización y regulación científica. Este debate taxonómico es relevante no solo en la biología sistemática, sino también en la biotecnología aplicada a la producción de biomasa y metabolitos bioactivos de esta cianobacteria (Sinetova, Kupriyanova, Los 2024).

La especie *Arthrospira platensis*, conocida comúnmente como espirulina, pertenece a la familia Microcoleaceae dentro del filo Cyanobacteria. Aunque históricamente se agrupó erróneamente bajo el género *Spirulina*, estudios recientes han confirmado su clasificación en *Arthrospira*, diferenciándose por su estructura filamentosa y su capacidad de formar tricomas helicoidales. Según Sinetova et al. (2024), su clasificación ha sido objeto de revisión debido a la confusión entre los géneros *Spirulina* y *Arthrospira*, con la reciente introducción del género *Limnospira* para algunas cepas comerciales. Esta distinción taxonómica es relevante para la investigación biotecnológica y la industria alimentaria, ya que *A. platensis* es una fuente valiosa de proteínas y compuestos bioactivos (Sinetova, Kupriyanova, Los 2024).

La espirulina es una cianobacteria con un perfil nutricional excepcionalmente rico, lo que la hace valiosa tanto en la alimentación humana como en la industria farmacéutica. Su composición se caracteriza por un alto contenido de proteínas, representando hasta el 60-70% de su peso seco, incluyendo todos los aminoácidos esenciales. También es una fuente relevante de ácidos grasos esenciales, como el ácido gamma-linolénico, el cual tiene propiedades antiinflamatorias. Además, contiene vitaminas del complejo B, vitamina E y provitamina A en forma de betacarotenos. Entre los minerales presentes en la espirulina se encuentran hierro, calcio, magnesio y zinc, los cuales contribuyen a diversas funciones metabólicas en el organismo. Un componente distintivo de la espirulina es la ficocianina, un pigmento antioxidante con propiedades inmunomoduladoras y hepatoprotectoras. Estas características hacen de la espirulina un superalimento con potencial en la prevención de deficiencias nutricionales y en la promoción de la salud (Spínola, Mendes, Prates 2024).

El crecimiento óptimo de *Spirulina platensis* depende de varios factores ambientales clave, incluyendo temperatura, pH y disponibilidad de nutrientes. Su ciclo de vida se caracteriza por un crecimiento rápido en condiciones alcalinas con un pH óptimo entre 9 y 10.5. La temperatura ideal para su



desarrollo oscila entre 30 y 37 °C, siendo sensible a temperaturas por debajo de 20 °C, lo que ralentiza su crecimiento. En términos de nutrientes, *Spirulina* requiere una alta concentración de nitrógeno en forma de nitratos o urea, además de fósforo, potasio, hierro y oligoelementos como magnesio y zinc. También necesita una fuente de carbono, como bicarbonato de sodio, para la fotosíntesis y producción de biomasa. Además, estos parámetros deben controlarse cuidadosamente en sistemas de cultivo abiertos y cerrados para maximizar la productividad y la calidad del producto final (AlFadhly, Alhelfi, Altemimi, Verma, Cacciola 2022).

### 3.2.2 Sistemas de cultivo de espirulina

Las condiciones geográficas afectan el cultivo al aire libre de *Spirulina* sp., evaluando su crecimiento, calidad de biomasa, composición química, compuestos volátiles, metales pesados y estabilidad térmica. La mayor radiación solar y temperaturas favorecieron un aumento en la productividad, con mejoras en el contenido de proteínas, ficocianina y ácidos grasos poliinsaturados como el  $\gamma$ -linolénico. Además, la biomasa cultivada presentó alta estabilidad térmica y compuestos volátiles que pueden servir como biomarcadores de la espirulina, cumpliendo con estándares internacionales de seguridad alimentaria. Sin embargo, las bajas temperaturas e intensidades luminosas redujeron las tasas de crecimiento, destacando la resistencia de la espirulina frente a condiciones ambientales variables (de Jesus, da Silva Uebel, Costa, Miranda, de Morais, de Morais, Costa, Nunes, de Souza Ferreira, Druzian 2018). Cuando las microalgas se cultivan en sistemas de cultivo al aire libre, se utiliza la fuente de luz natural proporcionada por el sol; sin embargo, cuando las microalgas se cultivan en sistemas de cultivo en interiores, se utilizan varias fuentes de luz artificial, como diodos emisores de luz (LED) y fibras ópticas (Soudagar, Kiong, Jathar, Nik Ghazali, Ramesh, Awasarmol, Ong 2024a).

Oswald fue la primera persona en construir el estanque raceway, también conocido como estanque abierto con rueda agitada, en la década de 1960 (Salama, Kurade, Abou-Shanab, El-Dalatony, Yang, Min, Jeon 2017). En los últimos años, la técnica de cultivo abierto que se ha utilizado con mayor



frecuencia para la generación de biomasa de microalgas ha sido el estanque raceway. Normalmente, la profundidad del estanque raceway es de unos 15-25 cm en su punto más profundo. En la mayoría de los casos, se construyen como un sistema de un solo canal o como un sistema de múltiples canales, ambos desarrollados conectando raceways individuales entre sí (Saha, Murray 2018). Se ha observado además que un estanque raceway tiene una productividad de biomasa de entre 60 y 100 mgL<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> (Razzak, Hossain, Lucky, Bassi, de Lasa 2013).

Sin embargo, también existen sistemas de cultivo de microalgas espirulina, como las Estanque circulares que son los primeros estanques artificiales utilizados en la producción de microalgas a gran escala son los estanques circulares. Este tipo de sistema de cultivo recibe su nombre del tanque de cultivo redondo que utiliza. Estos tanques normalmente tienen una profundidad que varía de 30 a 70 cm y un ancho de 45 m, y también tienen un agitador giratorio que se coloca en el medio del estanque; según varias investigaciones, el uso de una cubierta de plástico transparente podría ser un paso eficaz para abordar los desafíos que presenta la presencia de contaminación en los sistemas abiertos sin agitación (Soudagar, Kiong, Jathar, Nik Ghazali, Ramesh, Awasarmol, Ong 2024b).

Estanque sin agitación donde la mayoría de los sistemas naturales de estanques abiertos no incluyen una unidad de agitación en su diseño. La gran mayoría de los estanques abiertos sin mezclar están formados por lagunas, lagos y piscinas naturales. La operación y el seguimiento del procesamiento de microalgas se pueden hacer más fáciles, simples y rentables con el uso de dichos sistemas. En la mayoría de los casos, la profundidad del estanque natural no supera el medio metro para permitir que la luz atraviese el agua y sea absorbida por las células de las microalgas (Soudagar, Kiong, Jathar, Nik Ghazali, Ramesh, Awasarmol, Ong 2024b).

El cultivo en interior es el sistema de cultivo de microalgas que está sujeto a los controles y seguimientos más rigurosos. Debido a que el cultivo en interior se lleva a cabo en fotobiorreactores (PBR), este tipo de sistemas a veces se denominan sistemas de cultivo cerrados. En esos reactores, las microalgas se someten a una observación cuidadosa para comprobar si hay una iluminación



y una temperatura excesivas, así como la contaminación por parásitos, depredadores y especies de algas que compiten directamente con ellas el más conocido es el reactor de placa plana, también el reactor tubular vertical entre otros (Soudagar, Kiong, Jathar, Nik Ghazali, Ramesh, Awasarmol, Ong 2024b).

### **3.2.3 Parámetros tecnológicos en el cultivo de espirulina**

#### **3.2.3.1 Temperatura**

La temperatura óptima para el crecimiento de espirulina es de alrededor de 35-38 °C, mientras que la temperatura mínima requerida para cierto crecimiento es de unos 15°C. Prácticamente no hay instalación que está ubicada en un área donde la temperatura óptima se experimenta en todo el año. Por lo tanto, la producción en estanques al aire libre está limitada en su mayor parte por la temperatura. El cultivo de microalgas en fotobiorreactores ofrece un gran potencial para la producción sostenible a escala industrial. Comprender los parámetros físicos y biológicos que afectan el crecimiento y el rendimiento de la biomasa es esencial para diseñar y optimizar estas tecnologías. Factores como la intensidad y régimen de luz, la hidrodinámica, la transferencia de CO<sub>2</sub>, la temperatura, el pH y la concentración de nutrientes son clave para mejorar la eficiencia del cultivo, mientras que la escasez controlada de nitrógeno y fósforo a altas temperaturas puede aumentar la producción de lípidos, útil en aplicaciones específicas. Avances recientes en el diseño de fotobiorreactores han superado retos relacionados con el escalado, y el desarrollo continuo de esta tecnología es crucial para satisfacer la creciente demanda de soluciones sostenibles en bioenergía, tratamiento de aguas residuales y suplementos alimenticios (Abdur Razzak, Bahar, Islam, Haniffa, Faruque, Hossain, Hossain 2024).



### 3.2.3.2 Iluminación

En cuanto a la eficiencia fotosintética e irradiancia lumínica se refiere a la cantidad de energía luminosa que las microalgas pueden convertir el CO<sub>2</sub> atmosférico en energía química a través de la fotosíntesis. Una mayor irradiancia luminosa tiene mayores posibilidades de acumular más carbohidratos, lípidos y productividad de biomasa. Además de la intensidad de la luz, también es esencial entender que la irradiancia no es homogénea, especialmente en cultivos densos donde la penetración de la luz es relativamente baja (Béchet, Shilton, Guieysse 2013). Además, también se debe considerar la concentración de CO<sub>2</sub>, ya que es una fuente importante de carbono en la mayoría de las configuraciones de reactores y, además, ayuda a mantener el pH óptimo para el medio. El siguiente modelo muestra el efecto del crecimiento considerando la intensidad de la luz y la concentración de CO<sub>2</sub>. En algunos casos, el CO<sub>2</sub> también puede provocar la inhibición de sustrato, lo que se considera en el modelo (Abdur Razzak, Bahar, Islam, Haniffa, Faruque, Hossain, Hossain 2024).

Un problema común en los estanques abiertos tipo raceway para la producción de algas es la limitada penetración de luz, lo que restringe la profundidad del estanque a 25–30 cm (Sirikulrat, Pekkoh y Pumas 2021).

### 3.2.3.3 Composición del medio nutritivo

Los nutrientes esenciales en el medio de cultivo de *Spirulina platensis* incluyen nitrógeno, fósforo, potasio y una variedad de micronutrientes que desempeñan un papel crucial en su crecimiento y metabolismo. El nitrógeno, generalmente suministrado en forma de nitratos, urea o amonio, es fundamental para la síntesis de proteínas y la formación de pigmentos como la ficocianina. El fósforo es indispensable en la producción de ATP y la formación de fosfolípidos en la membrana celular, mientras que el potasio regula la osmorregulación y la síntesis de enzimas esenciales. Además, micronutrientes como el hierro, magnesio, zinc y manganeso son necesarios en pequeñas cantidades



para mantener la actividad enzimática y la fotosíntesis eficiente en la espirulina (Usharani, Saranraj y Kanchana, Nagar 2012).

Las variaciones en la concentración de estos nutrientes pueden tener un impacto significativo en la productividad y calidad nutricional de la biomasa de espirulina. Un exceso de nitrógeno puede aumentar la producción de proteínas, pero puede afectar la síntesis de pigmentos y lípidos esenciales. Por otro lado, la deficiencia de fósforo puede reducir la tasa de crecimiento y afectar la capacidad fotosintética. El balance adecuado de estos elementos es crucial para optimizar la producción de biomasa con un perfil nutricional equilibrado. Estudios como el de Madkour et al. (2012) han demostrado que ajustar las concentraciones de nutrientes en el medio de cultivo no solo mejora la tasa de crecimiento, sino que también optimiza la concentración de metabolitos bioactivos, aumentando el valor comercial y nutricional de la espirulina (Madkour, Kamil y Nasr 2012).

#### **3.2.3.4 Otros factores**

Se evaluaron los efectos de diferentes concentraciones de sal en el crecimiento, aroma y calidad de *Espirulina platensis*, utilizando concentraciones de 20, 25, 30 y 35 % para *espirulina platensis*. Los compuestos aromáticos analizados, y los azúcares y ácidos orgánicos, mediante HPLC, mostraron que en *Espirulina platensis* predominan el ácido glutámico, la alanina, la glucosa y la sacarosa. Sin embargo, el aumento de la concentración de sal redujo significativamente estos compuestos (Uzlasir, Isik, Uslu, Selli y Kelebek 2023).

Las microalgas pueden absorber y asimilar bicarbonato como fuente de carbono inorgánico en función de su capacidad para la interconversión intracelular y extracelular de dióxido de carbono y bicarbonato. Esta interconversión, catalizada por anhidrasas carbónicas, es una parte integral de la adquisición de carbono mediante mecanismos de concentración de carbono. A diferencia del crecimiento fotoautotrófico utilizando CO<sub>2</sub>, el pH del medio de cultivo aumenta significativamente



durante la asimilación de bicarbonato (Latagan, Nagarajan, Huang, de Luna, Chen, Rollon, Ng, Lee, Chang 2024). Una cantidad demasiado grande de CO<sub>2</sub> provocó que el crecimiento de la biomasa se inhibiera por el exceso de nivel de carbono, probablemente debido al aumento de la salinidad y la presión osmótica (Soletto, Binaghi, Ferrari, Lodi, Carvalho, Zilli y Converti 2008).

### **3.2.4 Efectos de los parámetros tecnológicos en el valor nutricional de la espirulina**

Los parámetros tecnológicos en el cultivo de *Spirulina platensis* tienen una relación directa con la concentración de proteínas, ácidos grasos, ficocianina y otros compuestos bioactivos en la biomasa final. Factores como la disponibilidad de nutrientes, la intensidad de la luz, la temperatura y la aireación afectan la síntesis de estas biomoléculas. Según Colla et al. (2019), la optimización del suministro de nitrógeno y fósforo mejora la acumulación de proteínas, mientras que la modificación de la intensidad lumínica puede incrementar la producción de ficocianina, un pigmento con propiedades antioxidantes y antiinflamatorias. Además, la cantidad y calidad de los ácidos grasos esenciales, como el ácido gamma-linolénico, pueden ser moduladas a través del ajuste de la relación carbono/nitrógeno en el medio de cultivo. Estos parámetros deben ser cuidadosamente controlados para maximizar la productividad y garantizar un perfil nutricional óptimo de la espirulina (Lupatini Menegotto, Souza, Colla, Costa, Sehn, Bittencourt, Moraes Flores, Canan y Colla 2019).

Las condiciones de cultivo también influyen en la calidad nutricional de la biomasa obtenida. AlFadhly et al. (2022) han demostrado que un déficit de nutrientes puede comprometer la producción de proteínas y lípidos esenciales, mientras que un exceso de algunos micronutrientes puede generar estrés oxidativo en las células, reduciendo la eficiencia de crecimiento y la acumulación de metabolitos bioactivos. Del mismo modo, la temperatura del medio de cultivo afecta la biosíntesis de ficocianina y otros pigmentos fotosintéticos, lo que impacta en su capacidad antioxidante y valor funcional en aplicaciones nutracéuticas. Por ello, la implementación de sistemas de



cultivo optimizados, combinados con estrategias de biorrefinería, puede mejorar la calidad de la espirulina para su uso en la industria alimentaria y farmacéutica (AlFadhly, Alhelfi, Altemimi, Verma, Cacciola y Narayanankutty 2022).

### 3.2.5 Efectos de los parámetros tecnológicos en el rendimiento del cultivo

La productividad de biomasa en *Spirulina platensis* está fuertemente influenciada por parámetros ambientales como la temperatura, el pH y la iluminación. Según Soni et al. (2019), la temperatura óptima para el crecimiento de *Spirulina* se encuentra entre 30 y 37 °C, con una reducción significativa en la tasa de crecimiento por debajo de los 20 °C. Asimismo, un pH alcalino entre 9 y 10.5 favorece la asimilación de nutrientes y la estabilidad de la biomasa. En términos de iluminación, la intensidad y duración de la luz son esenciales para la fotosíntesis, con valores óptimos entre 60 y 120  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Un suministro inadecuado de luz reduce la eficiencia fotosintética y limita la producción de biomasa, mientras que una iluminación excesiva puede inducir fotoinhibición y estrés oxidativo en las células (Soni, Sudhakar, Rana 2019).

La evaluación de la productividad en términos de gramos por litro por día (g/L/día) varía dependiendo de las condiciones de cultivo. Magwell et al., (2021) reportaron una productividad máxima de 0.98 g/L/día en medios enriquecidos con bicarbonato de sodio y en condiciones óptimas de temperatura y pH. En sistemas de cultivo al aire libre, la productividad puede verse afectada por fluctuaciones ambientales, alcanzando valores promedio de 0.5 a 1.5 g/L/día. Además, el ajuste de la relación carbono/nitrógeno en el medio de cultivo puede incrementar la tasa de crecimiento, mejorando la eficiencia de conversión de nutrientes en biomasa. Estas evaluaciones son fundamentales para optimizar la producción de *Spirulina* en entornos industriales y garantizar una producción eficiente y sostenible (Magwell, Minyaka, Fotsop, Leng y Lehman 2021).



### 3.3. Marco conceptual

**Espirulina (*Arthrospira platensis*):** Microalga filamentosa clasificada como cianobacteria, rica en proteínas, vitaminas y compuestos bioactivos, utilizada en alimentos funcionales, suplementos y bioprocesos industriales (Torzillo, Vonshak 2013).

**Microalgas:** Organismos microscópicos fotosintéticos que incluyen cianobacterias y algas verdes, con aplicaciones en bioenergía, alimentación y tratamiento de aguas residuales (Torzillo, Vonshak 2013).

**Cianobacterias:** Grupo de bacterias fotosintéticas, también llamadas algas verdeazules, capaces de fijar nitrógeno y producir compuestos bioactivos (Richmond Amos 2004).

**Fotoperiodo:** Ciclos alternantes de luz y oscuridad que influyen en la fotosíntesis y el metabolismo de las microalgas (Torzillo, Vonshak 2013).

**Densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD):** Cantidad de fotones útiles para la fotosíntesis que inciden en un área específica por segundo, medida en  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Ras, Steyer, Bernard 2013).

**Tasa de alimentación de dióxido de carbono (FFF):** Cantidad de  $\text{CO}_2$  suministrada al cultivo por unidad de tiempo y volumen, clave para mantener el equilibrio del carbono (Chisti 2007).

**Crecimiento celular:** Incremento en el número o masa de células en un cultivo, representado por fases como lag, exponencial y estacionaria (Richmond Amos 2004).

**Fotoinhibición:** Reducción en la eficiencia fotosintética debido a una exposición excesiva a la luz (Torzillo, Vonshak 2013).

**Fotolimitación:** Disminución del crecimiento celular por insuficiencia de luz disponible para la fotosíntesis (Richmond Amos 2004).

**Eficiencia de utilización de carbono (CUE):** Porcentaje de carbono suministrado que se asimila en la biomasa (Chisti 2007).

**Eficiencia fotosintética:** Relación entre la energía luminosa absorbida y convertida en biomasa, expresada como porcentaje (Torzillo, Vonshak 2013).

**Biomasa:** Materia orgánica producida por las microalgas, medida como peso seco y utilizada para evaluar rendimiento (Richmond Amos 2004).



**Composición bioquímica:** Proporción de componentes como proteínas, lípidos y carbohidratos en la biomasa, clave para aplicaciones específicas (Richmond Amos 2004).

**Producción de lípidos:** Acumulación de lípidos en condiciones específicas, útil para biocombustibles (Chisti 2007).

**pH del medio:** Parámetro que afecta la estabilidad química y el metabolismo de las microalgas (Richmond Amos 2004).

**Temperatura:** Factor que regula las tasas metabólicas y el crecimiento, con rangos óptimos específicos para cada especie (Richmond Amos 2004).

**Transferencia de masa:** Intercambio de gases ( $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$ ) entre el medio y las células, influenciado por la agitación y diseño del sistema (Chisti 2007).

**Hidrodinámica:** Movimiento del medio en fotobiorreactores que influye en la distribución de nutrientes y luz (Ras, Steyer, Bernard 2013).

**Espectrofotometría:** Técnica para medir la densidad óptica del cultivo y estimar la concentración celular (Richmond Amos 2004).

**Secado a peso constante:** Método para determinar el contenido de biomasa seca mediante eliminación de agua (Richmond Amos 2004).

**Optimización de cultivos:** Estrategias para maximizar el crecimiento y la productividad mediante ajustes en parámetros clave (Chisti 2007).

**Producción sostenible:** Métodos que minimizan el impacto ambiental y los costos asociados al cultivo de microalgas (Brennan, Owende 2010).



## CAPÍTULO IV METODOLOGÍA

### 4.1 Tipo y nivel de investigación

#### 4.1.1 Tipo de investigación

De acuerdo a su propósito la investigación es aplicada porque busca optimizar el cultivo continuo de microalgas espirulina en canales abiertos, maximizando crecimiento y productividad, por la manipulación de variables es experimental debido a la manipulación de parámetros tecnológicos como pH, temperatura, intensidad de luz y aireación; en cuanto al enfoque metodológico es cuantitativa, centrada en la medición de variables como biomasa, valores nutricionales y en cuanto al entorno es semicontrolado ya que el estanque se encontraba en un entorno parcialmente controlado y por el alcance temporal sería longitudinal dado que el crecimiento y la productividad se evalúan durante un periodo de tiempo definido (Hernández Sampieri Roberto 2014).

#### 4.1.2 Nivel de investigación

La investigación es de nivel descriptivo porque caracteriza cómo los parámetros tecnológicos afectan variables dependientes como valores nutricionales y rendimiento, a la vez es explicativo porque busca determinar relaciones causales entre parámetros tecnológicos y variables como crecimiento y productividad (Hernández Sampieri Roberto 2014).

### 4.2 Diseño de la investigación

**4.2.1 Diseño Experimental:** Se empleó en el desarrollo de la investigación un diseño factorial fraccionado  $2^{k-1}$  para evaluar la influencia de parámetros tecnológicos como (temperatura, velocidad de flujo e intensidad lumínica) sobre producción de biomasa y la calidad nutricional del cultivo de (*Arthrospira platensis*) en canales abiertos. Este diseño permitió reducir el número de combinaciones experimentales necesarias al seleccionar estratégicamente las condiciones más relevantes, identificando los factores clave, optimizando así los recursos del experimento.



**Tabla 2 — Diseño factorial fraccionado**

Tratamiento	Temperatura (A)	Velocidad de Flujo (B)	Intensidad Lumínica (C)	Producción de Biomasa	Calidad Nutricional
1	-	-	-		
2	-	+	+		
3	+	-	+		
4	+	+	-		

(-) Menor valor del nivel

(+) Mayor valor del nivel

- **Características clave:**

**Factores experimentales:** Parámetros tecnológicos.

**Tratamientos:** Combinaciones específicas de niveles de cada parámetro.

**Control:** Monitoreo constante de las condiciones mediante instrumentos como multiparámetros, luxómetros y flotadores.

#### 4.2.2 Diseño específico

El estudio es un diseño Factorial, donde:

- **Factores:**

1. Temperatura: Ambiente (18°C) y controlada (28°C).
2. Velocidad de flujo: 0.15 m/s y 0.30 m/s.
3. Intensidad lumínica: >5000 lux y <5000 lux.

- **Niveles:** Dos niveles por factor.

- **Número de tratamientos:**  $2 \times 2 = 4$  combinaciones.

- **Repeticiones:** Se realizó 3 repeticiones por tratamiento para garantizar validez estadística.

- **Unidad experimental:** Canales abiertos adaptados para el cultivo continuo de espirulina.

#### 4.2.3 Variables del Estudio

**Variable independiente:** Los parámetros tecnológicos manipulados son:

1. Temperatura.
2. Velocidad de flujo.
3. Intensidad lumínica.



#### **Variable dependiente:**

- **Rendimiento**, medido a través de:
  - **Biomasa:** Determinada como peso seco (g/L).
  - **Valores nutricionales:** Contenido de proteínas, Magnesio, fosforo, Potasio, Calcio, Hierro.

#### **4.3 Descripción ética de la investigación**

La investigación sobre el cultivo continuo de espirulina (*Arthrospira platensis*) en canales abiertos se realizó bajo principios éticos, cumpliendo normativas nacionales e internacionales. Se protegió el medio ambiente mediante el tratamiento de aguas residuales y el uso eficiente de recursos. Los datos se registraron y divulgaron de forma transparente, asegurando su reproducibilidad científica y confidencialidad. Se implementaron protocolos de bioseguridad para proteger al personal y garantizar la seguridad en el laboratorio. Además, se obtuvieron los permisos necesarios y se respetaron las costumbres locales al utilizar recursos comunitarios. Este enfoque ético garantizó la integridad científica y el impacto positivo de la investigación.

#### **4.4 Población y muestra**

##### **Población**

La población de esta investigación corresponde a sistemas de cultivo continuo de espirulina (*Arthrospira platensis*) en canales abiertos semicontrolados. Estos sistemas están diseñados para evaluar el impacto de los parámetros tecnológicos sobre el crecimiento, productividad, calidad nutricional.

##### **Muestra**

La muestra está constituida por las unidades experimentales derivadas de las diferentes combinaciones de parámetros tecnológicos implementados en el canal semicontrolado. Estas combinaciones corresponden a un diseño factorial fraccionado 2×2, con 4 tratamientos resultantes de la manipulación de niveles de temperatura (ambiente y controlada), velocidad de flujo (0.15 m/s y 0.30 m/s) e intensidad lumínica (>20,000 lux y <5,000 lux). Cada tratamiento se replicó tres veces, generando un total de 12 unidades experimentales evaluadas dentro del canal semicontrolado.



## **Muestreo**

El muestreo realizado fue de tipo intencional y estructurado, ya que se seleccionaron combinaciones específicas de niveles de los parámetros tecnológicos para garantizar la cobertura de todas las condiciones experimentales establecidas por el diseño factorial. Cada unidad experimental fue monitoreada dentro del canal semicontrolado, asegurando uniformidad en las condiciones iniciales del medio de cultivo, la densidad de inoculación de espirulina (0.5 g/L de biomasa) y los procedimientos de medición, lo que garantiza la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos.

## **4.5 Procedimiento**

### **Instalación de canal abierto**

1. Establecer un canal abiertos con condiciones controladas para los tratamientos, con dimensiones estándar de un material de acero inoxidable, de capacidad de 700.00 litros de volumen.
2. Implementar un sistema de aireación para mantener el flujo controlado en el canal.

### **Preparación del medio de cultivo**

1. Preparar un medio de cultivo estándar con nutrientes esenciales (bicarbonato, nitrógeno, fosforo) según la bibliografía.
2. Ajustar las condiciones iniciales de pH, temperatura y luz en el canal experimental.

### **Inoculación**

1. Inocular en el canal abierto el cultivo con una densidad inicial de espirulina equivalente a 0.15 g/l (biomasa).

### **Monitoreo y recolección de datos**

1. Medir la biomasa mediante densidad, mediante microscopia.
2. Monitorear parámetros independientes (temperatura, pH, luz, velocidad de flujo) con sensores especializados.
3. Tomar muestras representativas para análisis de calidad nutricional.
4. Evaluar la productividad acumulada (g/L/día).
5. Control de agua y nutrientes, registrar la evaporación y reponer agua según sea necesario.



6. Reabastecer nutrientes para evitar limitaciones durante el crecimiento de las microalgas.
7. Para el análisis final, para determinar la biomasa se ha secado las muestras recolectadas a peso constante en un horno (60°C por 24.00 horas).
8. Calcular la biomasa final (g/L) para cada tratamiento.
9. Para el análisis de calidad nutricional se continuo con el procedimiento anterior, con la diferencia de mayor volumen.

#### **4.6 Técnicas e instrumentos**

##### **Técnica de recolección de Datos**

La técnica principal empleada para la recolección de datos en esta investigación fue la observación estructurada con medición directa, complementada con análisis químicos en laboratorio. Este enfoque permitió registrar sistemáticamente las variables independientes (temperatura, pH, velocidad de flujo e intensidad lumínica) y las variables dependientes (crecimiento, productividad y calidad nutricional de la espirulina) en un entorno semicontrolado, utilizando instrumentos especializados y protocolos estandarizados.

La observación estructurada consistió en el monitoreo diario de los parámetros tecnológicos mediante el uso de sensores multiparámetro para medir la temperatura y el pH, un luxómetro para determinar la intensidad lumínica, y un flotador para calcular la velocidad de flujo en el canal abierto. Estas mediciones se realizaron a intervalos regulares, asegurando la consistencia de los datos recolectados y minimizando posibles errores en el proceso.

Para evaluar la calidad nutricional de la biomasa, se realizaron análisis químicos al final de cada tratamiento en un laboratorio especializado LA MOLINA CALIDAD TOTAL. Estos procedimientos estandarizados aseguraron la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos.

Adicionalmente, se implementaron registros fotográficos periódicos para documentar las condiciones visuales del cultivo y posibles variaciones morfológicas en la espirulina.



### **Instrumentos**

Los instrumentos utilizados en esta investigación fueron seleccionados para garantizar la precisión y fiabilidad en la medición de las variables clave.

- Sensor multiparámetro: Medición de pH, temperatura y otros parámetros físico-químicos.
- Luxómetro: Para determinación de la intensidad lumínica.
- Flotador: Para medición de la velocidad de flujo.
- Laboratorio químico: Análisis nutricional de proteínas, lípidos, cenizas y minerales.

### **4.7 Análisis estadístico**

El análisis estadístico de la investigación combinó métodos descriptivos e inferenciales para interpretar los datos obtenidos. El análisis descriptivo incluyó el cálculo de medias, desviaciones estándar y rangos para las variables dependientes, como biomasa, productividad y calidad nutricional, proporcionando una visión general de los resultados. En el análisis inferencial, se utilizó un ANOVA multifactorial para evaluar los efectos individuales y combinados de los parámetros tecnológicos (temperatura, velocidad de flujo y intensidad lumínica) sobre las variables dependientes, además se desarrolló con Software Minitab Statistical versión 21. Además, se aplicaron pruebas post hoc de Tukey para identificar diferencias significativas entre los tratamientos, para ello se trabajó con significancia de 0.05 (5%). Por último, se empleó un modelo de regresión múltiple para establecer relaciones cuantitativas entre los parámetros tecnológicos y el rendimiento del cultivo, permitiendo identificar las condiciones óptimas para maximizar la productividad y la calidad de la espirulina. Este enfoque estadístico garantizó un análisis riguroso y objetivo de los resultados.

- **Análisis descriptivo:**

Media, desviación estándar y rangos de las variables dependientes.

- **Análisis inferencial:**

**ANOVA multifactorial:** Para evaluar el efecto de cada factor y sus interacciones sobre las variables dependientes.



## CAPÍTULO V

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 5.1 Análisis de resultados

**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.

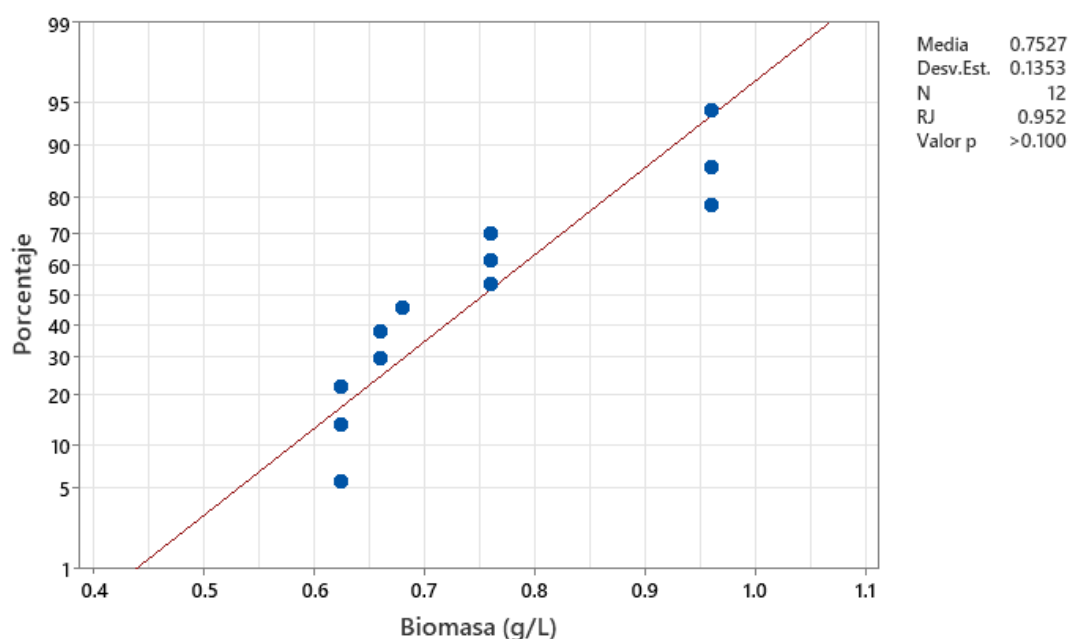
**Tabla 3 — Estadísticos descriptivos**

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

**Nota:** El análisis estadístico descriptivo de las 12 muestras muestra que la biomasa tiene baja variabilidad ( $\sigma = 0.1353$ ), indicando estabilidad en la producción. El contenido proteico es alto (56.164 g/100g) y muy homogéneo ( $\sigma = 0.163$ ). Entre los minerales, potasio (2195.6 mg/100g) y fósforo (1115.6 mg/100g) presentan las mayores concentraciones y alta dispersión, las variables presentaron distribución normal ( $p > 0.100$ ). Se validó el uso de análisis paramétricos, además los resultados muestran precisión, homogeneidad y estabilidad, asegurando la confiabilidad del sistema evaluado mediante prueba de Shapiro Wilk.

### A. Prueba de normalidad para biomasa

La prueba de normalidad es un análisis estadístico utilizado para determinar si los datos de biomasa (g/L) siguen una distribución normal, un requisito fundamental para aplicar pruebas paramétricas como la correlación de Pearson o la regresión lineal. Métodos como Shapiro-Wilk permiten evaluar esta suposición. Si los datos presentan una distribución normal, se pueden utilizar análisis estadísticos paramétricos; de lo contrario, se recomienda emplear métodos no paramétricos, como la correlación de Spearman, para obtener resultados más confiables.

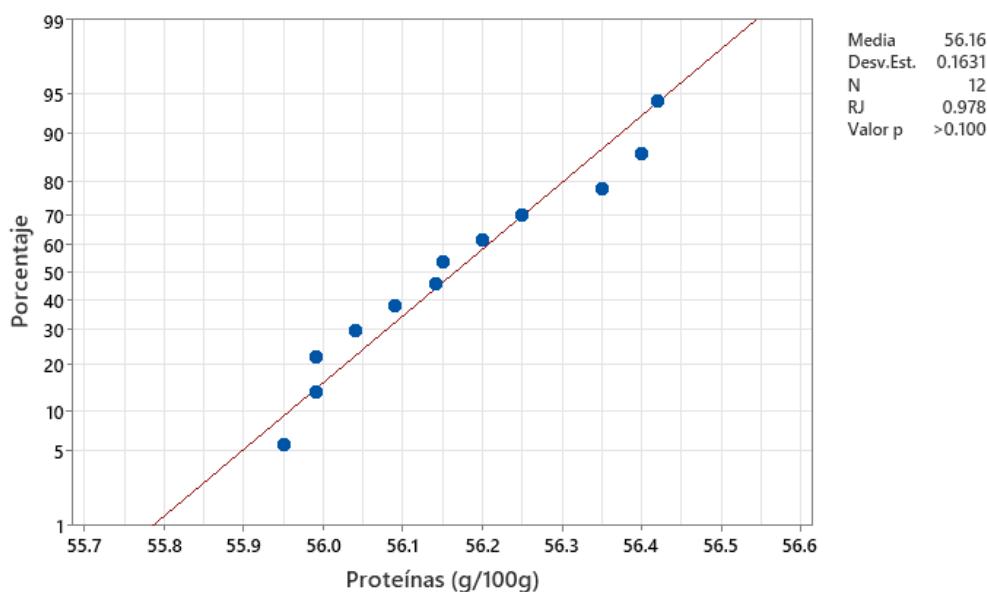


**Figura 1 — Prueba de normalidad para biomasa**

En la figura muestra una fuerte correlación positiva entre la biomasa (g/L) y el porcentaje, con un coeficiente de correlación  $RJ = 0.952$ , lo que indica que la biomasa explica gran parte de la variabilidad del porcentaje. Sin embargo, el valor  $p > 0.100$  sugiere que la relación no es estadísticamente significativa, posiblemente debido al tamaño de muestra reducido ( $N = 12$ ) o a la dispersión de los datos. El análisis es paramétrico, ya que se basa en estadísticos como la media (0.7527 g/L) y la desviación estándar (0.1353 g/L), que asumen normalidad en los datos. Aunque la tendencia es clara, se recomienda verificar la normalidad de los datos y aumentar el tamaño de la muestra para obtener conclusiones más robustas.



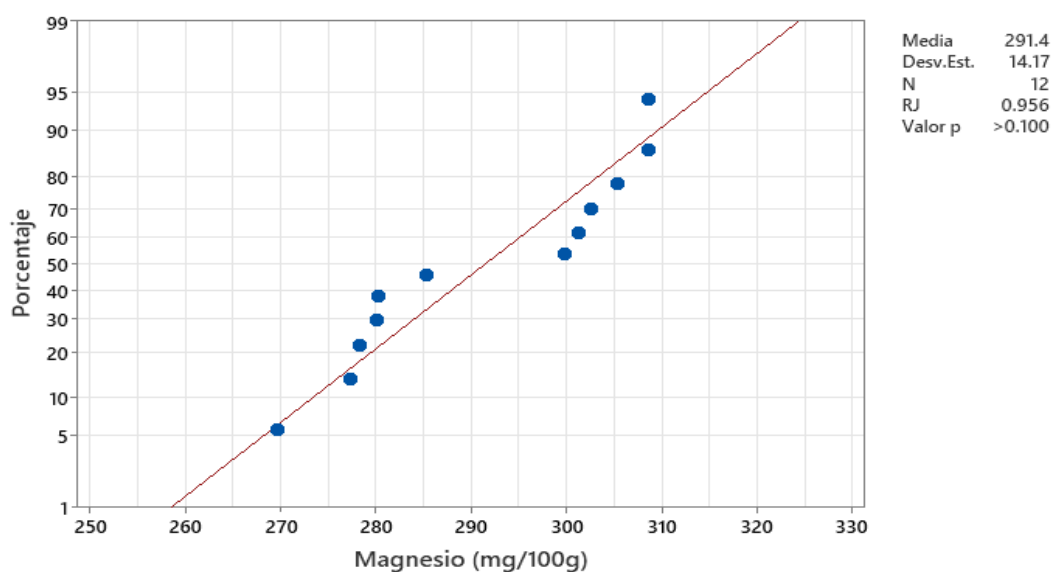
### B. Prueba de normalidad para proteína



**Figura 2 — Prueba de normalidad para proteína**

La prueba de normalidad para el contenido de proteínas (g/100g) indica que los datos siguen una distribución normal, ya que se ajustan bien a la línea esperada y el valor  $p > 0.100$  no permite rechazar la hipótesis nula de normalidad. Además, el coeficiente de correlación  $RJ = 0.978$  confirma un alto ajuste a la distribución normal. Dado esto, el análisis es paramétrico, lo que permite el uso de pruebas estadísticas como ANOVA o regresión lineal para análisis posteriores.

### C. Prueba de normalidad para magnesio



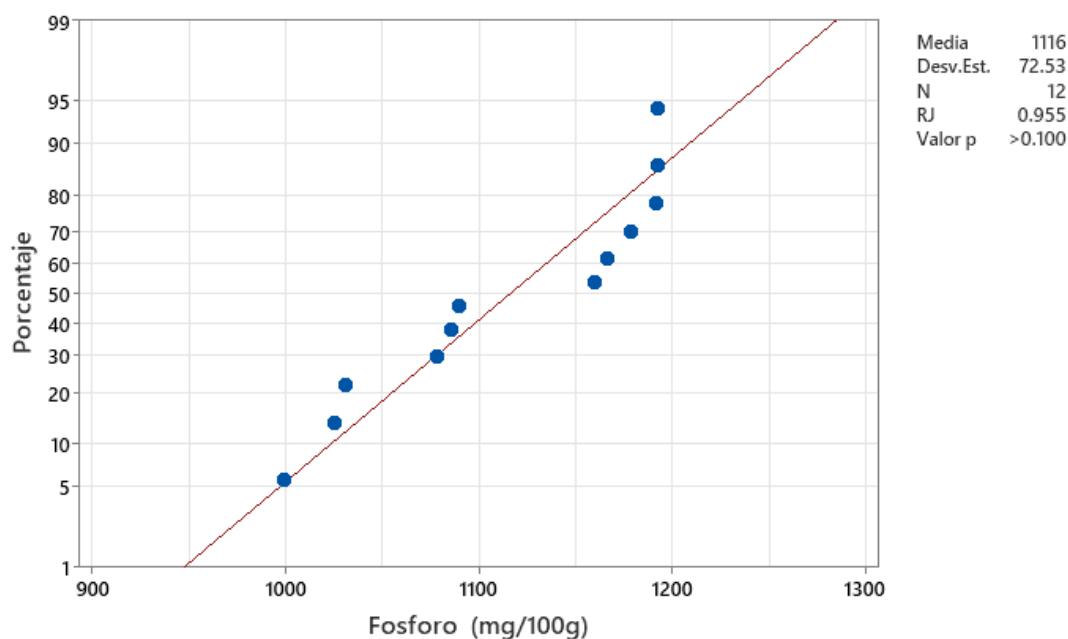
**Figura 3 — Prueba de normalidad para magnesio**



La gráfica de probabilidad muestra que la distribución del contenido de magnesio (mg/100g) sigue un comportamiento normal, ya que los puntos se ajustan bien a la línea de normalidad. Esto es respaldado por el coeficiente de correlación  $RJ = 0.956$ , que indica un alto ajuste a la distribución normal, y el valor  $p > 0.100$ , que sugiere que no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis de normalidad. La media del magnesio es 291.4 mg/100g con una desviación estándar de 14.17 mg/100g, reflejando una variabilidad moderada.

Dado que los datos cumplen con la suposición de normalidad, el análisis es paramétrico, permitiendo el uso de pruebas estadísticas como ANOVA, regresión lineal o pruebas t para estudios posteriores.

#### D. Prueba de normalidad para Fosforo



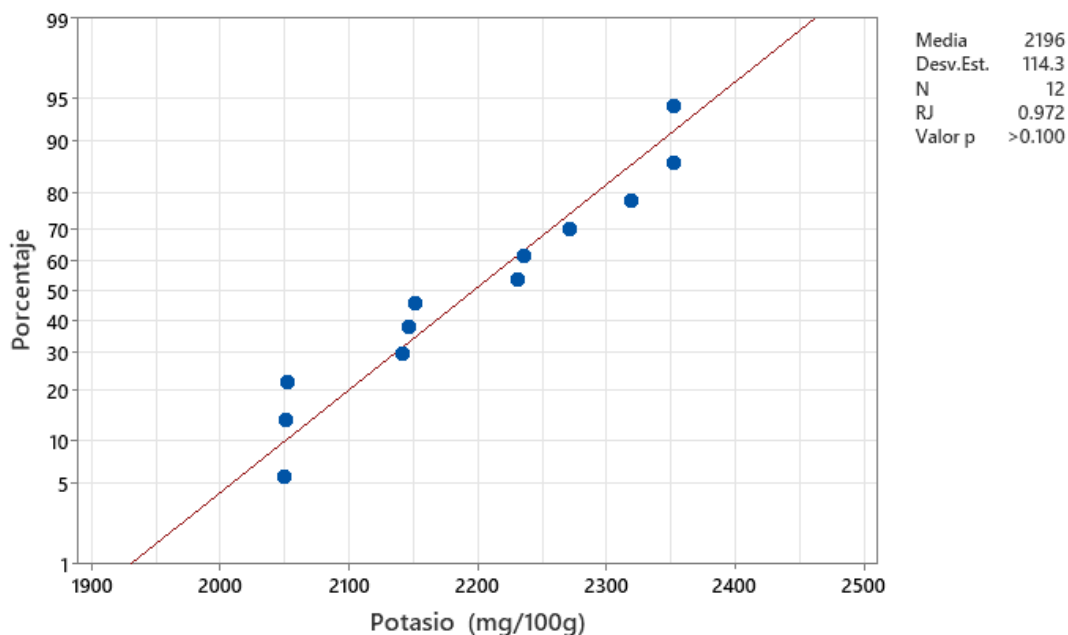
**Figura 4 — Prueba de normalidad para fosforo**

La gráfica de probabilidad muestra que la distribución del fósforo (mg/100g) sigue una distribución normal, ya que los puntos se ajustan bien a la línea de normalidad. Esto se confirma con el coeficiente de correlación  $RJ = 0.955$ , que indica un alto ajuste a la distribución normal, y con el valor  $p > 0.100$ , lo que sugiere que no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis de normalidad. La media del fósforo es 1116 mg/100g, con una desviación estándar de 72.53 mg/100g, indicando una variabilidad moderada en los datos.



Dado que los datos cumplen con la normalidad, el análisis es paramétrico, permitiendo el uso de pruebas estadísticas como ANOVA, regresión lineal o pruebas t para estudios posteriores.

### E. Prueba de normalidad para Potasio



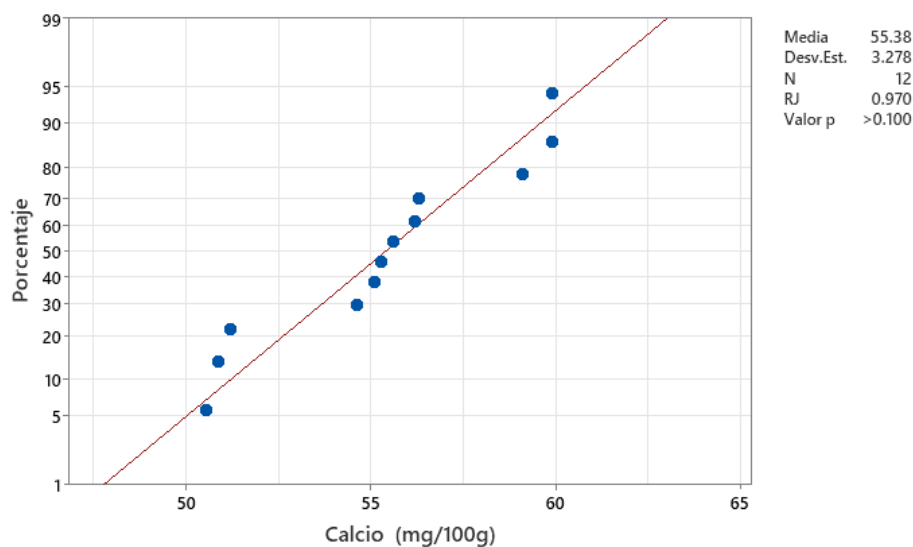
**Figura 5 — Prueba de normalidad para potasio**

La gráfica de probabilidad muestra que la distribución del potasio (mg/100g) sigue una distribución normal, ya que los puntos se ajustan bien a la línea de normalidad. El coeficiente de correlación  $RJ = 0.972$  indica un alto ajuste a la distribución normal, y el valor  $p > 0.100$  confirma que no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis de normalidad. La media del potasio es 2196 mg/100g, con una desviación estándar de 114.3 mg/100g, lo que indica una dispersión moderada en los datos.

Dado que los datos cumplen con la normalidad, el análisis es paramétrico, permitiendo el uso de pruebas estadísticas como ANOVA, regresión lineal o pruebas t para análisis comparativos y de inferencia.



### F. Prueba de normalidad para Calcio

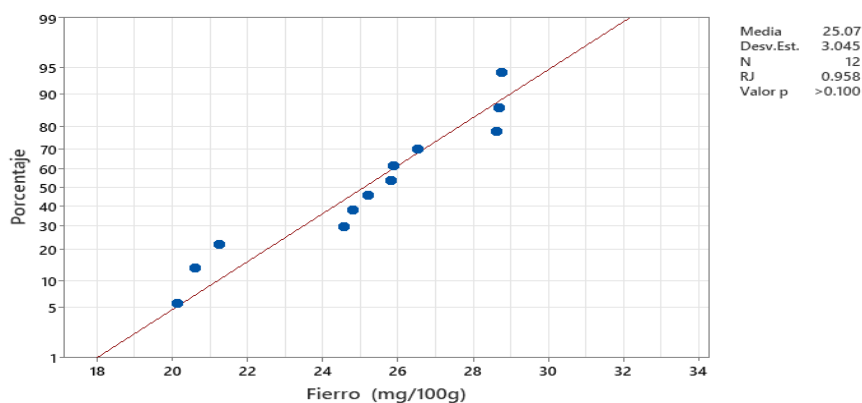


**Figura 6 — Prueba de normalidad para calcio**

La gráfica de probabilidad muestra que la distribución del calcio (mg/100g) sigue un comportamiento normal, ya que los puntos se ajustan bien a la línea de normalidad. Esto es respaldado por el coeficiente de correlación RJ = 0.970, que indica un alto ajuste a la distribución normal, y el valor  $p > 0.100$ , lo que sugiere que no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis de normalidad. La media del calcio es 55.38 mg/100g, con una desviación estándar de 3.278 mg/100g, reflejando una variabilidad baja en los datos.

Dado que los datos cumplen con la normalidad, el análisis es paramétrico, lo que permite el uso de pruebas estadísticas como ANOVA, regresión lineal o pruebas t para análisis comparativos e inferencias estadísticas.

### G. Prueba de Normalidad para hierro



**Grafica 7 — Prueba de normalidad para hierro**



La gráfica de probabilidad indica que la distribución del hierro (mg/100g) sigue una distribución normal, ya que los puntos se ajustan bien a la línea de normalidad. Esto es respaldado por el coeficiente de correlación  $RJ = 0.958$ , que muestra un alto ajuste a la distribución normal, y el valor  $p > 0.100$ , lo que sugiere que no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis de normalidad. La media del hierro es 25.07 mg/100g, con una desviación estándar de 3.045 mg/100g, lo que indica una variabilidad moderada en los datos.

Dado que los datos cumplen con la normalidad, el análisis es paramétrico, lo que permite el uso de pruebas estadísticas como ANOVA, regresión lineal o pruebas t para análisis comparativos e inferenciales.

**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.

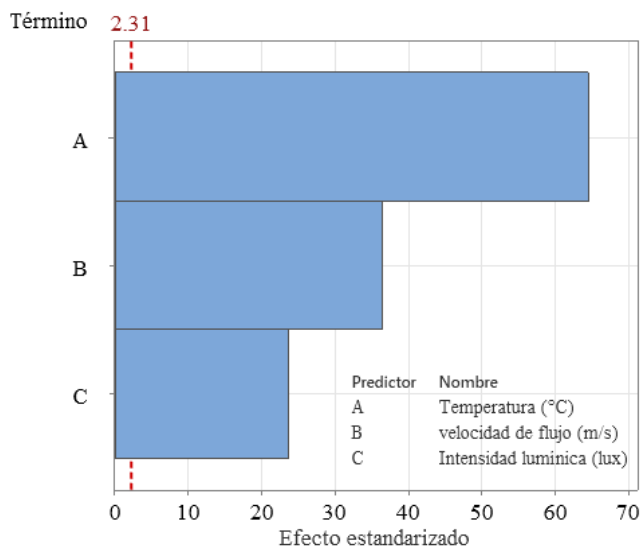
**Tabla 4 — Análisis de regresión: Biomasa (g/L) vs. Temperatura (°C); velocidad de flujo (m/s); Intensidad lumínica (lux)**

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			

**Nota:** 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

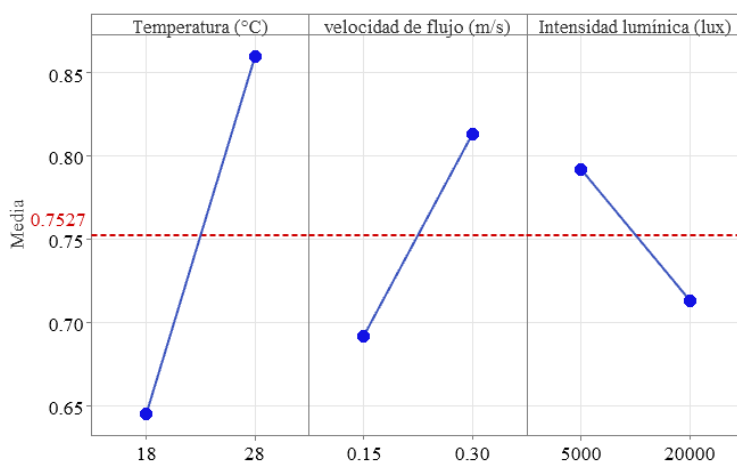


significancia estadística ( $p=0.000$ ). El error es mínimo ( $SC\ Error = 0.000267$ ), lo que indica un excelente ajuste del modelo y confirma que los tres factores afectan significativamente la biomasa, con la temperatura como el factor predominante.



**Figura 8 — 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.



**Figura 9 — Grafica de efectos principales para biomasa (g/l)**

La gráfica de efectos principales muestra que la temperatura (°C) tiene el mayor impacto positivo en la biomasa, aumentando significativamente de 0.65 g/L a 0.85



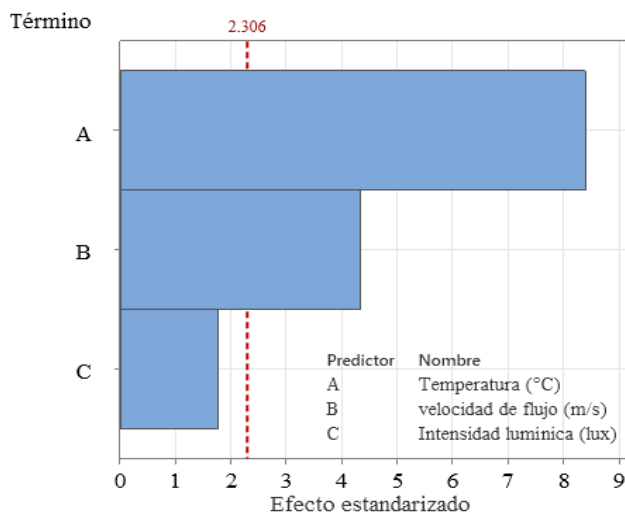
g/L al pasar de 18°C a 28°C. La velocidad de flujo (m/s) también influye positivamente, mejorando la biomasa de 0.70 g/L a 0.80 g/L al incrementar de 0.15 a 0.30 m/s. En contraste, la intensidad lumínica (lux) tiene un efecto negativo, reduciendo la biomasa de 0.77 g/L a 0.73 g/L al aumentar de 5000 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 5 — 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 (°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			

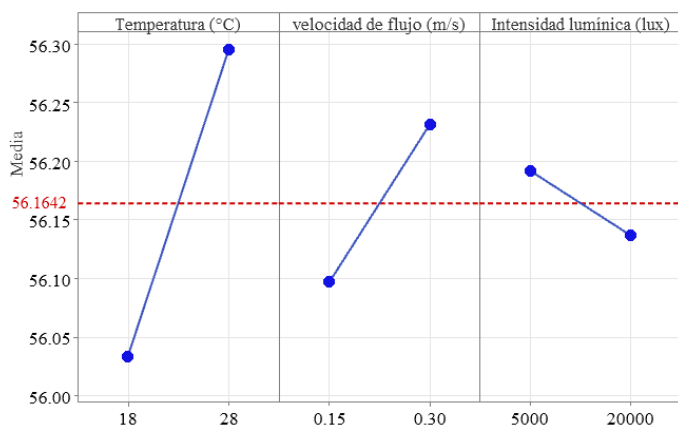
**Nota:** El ANOVA indica que el modelo de regresión es altamente significativo ( $p < 0.001$ ,  $F = 30.76$ ), explicando la mayor parte de la variabilidad en la biomasa (SC Regresión = 0.269158 de 0.292492). La temperatura ( $F = 70.43$ ,  $p = 0.000$ ) es el factor más influyente, seguida por la velocidad 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.





**Figura 10 — 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.



**Figura 11 — Grafica 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



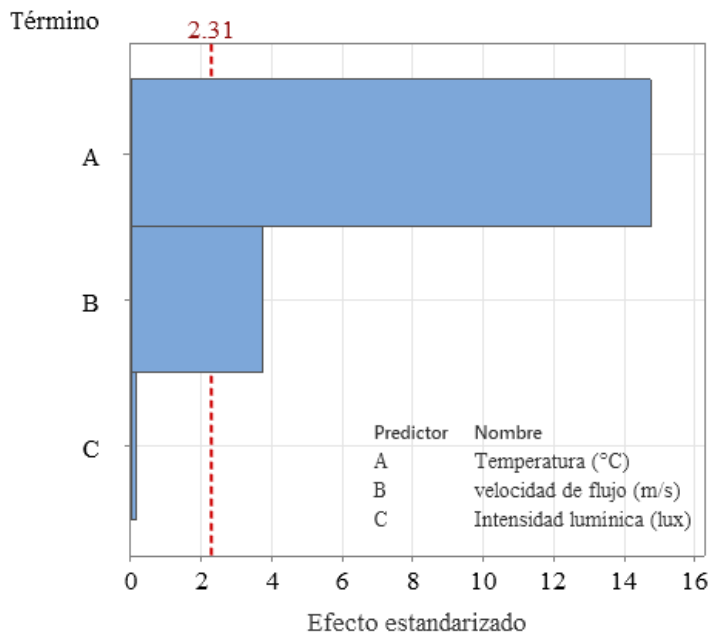
temperatura es el factor más influyente, seguido por la velocidad de flujo, mientras que una mayor intensidad lumínica perjudica la producción de proteínas.

**Tabla 6 — 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			

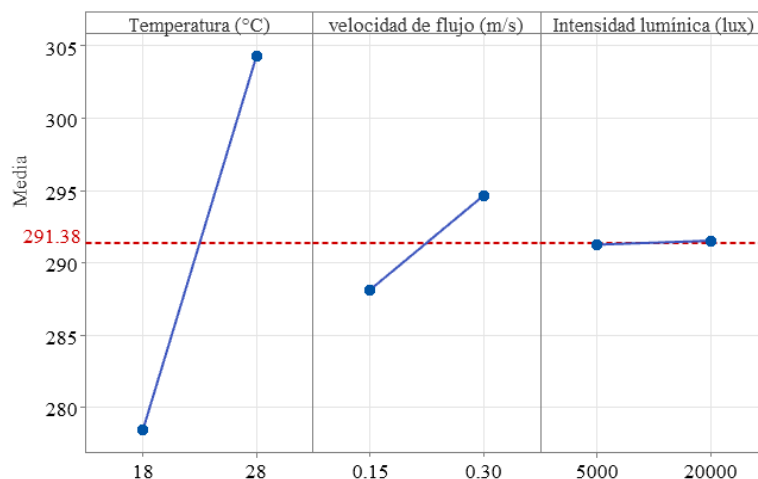
**Nota:** El ANOVA indica que el modelo de regresión es altamente significativo ( $p < 0.001$ ,  $F = 76.98$ ), explicando casi toda la variabilidad en la respuesta (SC Regresión = 2134.43 de 2208.37). La temperatura ( $F = 217.09$ ,  $p = 0.000$ ) es el factor más influyente, seguida por la velocidad 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.





**Figura 12 — 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.



**Figura 13 — 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

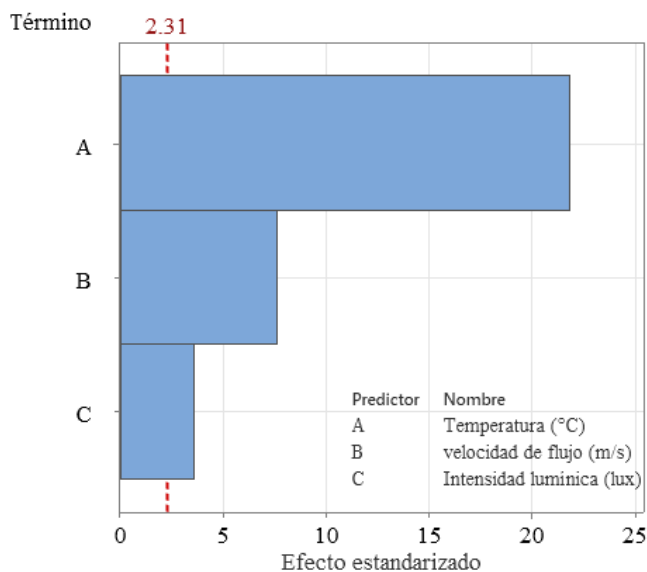


significativamente cuando pasa de 18°C a 28°C. La velocidad de flujo (m/s) también influye positivamente, incrementando el contenido de magnesio al aumentar de 0.15 a 0.30 m/s. En contraste, la intensidad lumínica (lux) no muestra un efecto relevante, ya que los valores se mantienen constantes. Estadísticamente, la temperatura es el factor más determinante.

**Tabla 7 — Análisis predictivo de magnesio (mg/100g) mediante regresión múltiple basada en factores operacionales**

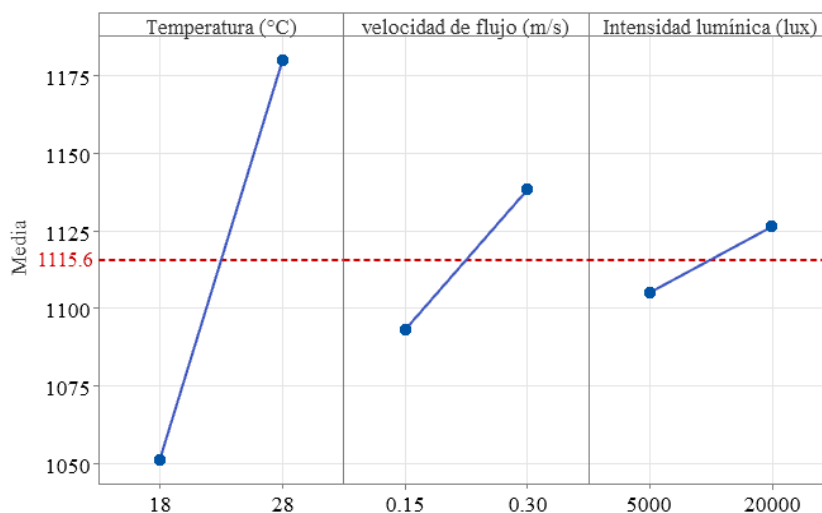
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	3	57036.2	19012.1	182.14	0.000
Temperatura (°C)	1	49606.2	49606.2	475.24	0.000
velocidad de flujo (m/s)	1	6081.3	6081.3	58.26	0.000
Intensidad lumínica (lux)	1	1348.7	1348.7	12.92	0.007
Error	8	835.1	104.4		
Total	11	57871.3			

**Nota:** 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.



**Figura 14 — 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.



**Figura 15 — 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



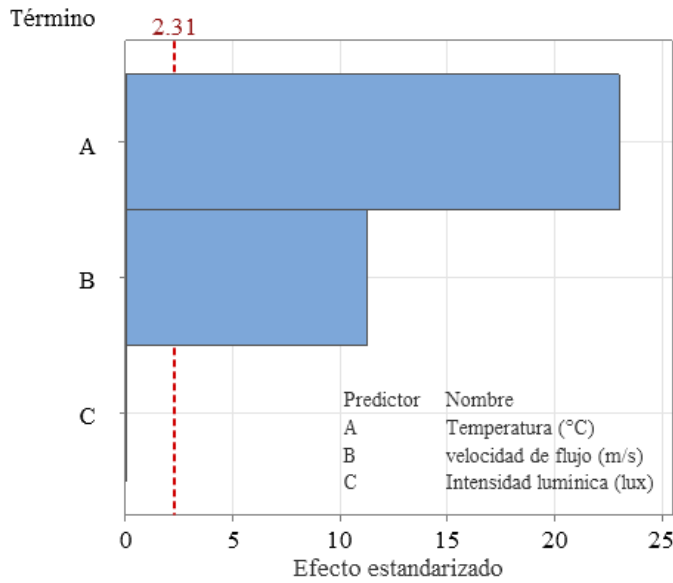
menor medida. En contraste, la intensidad lumínica (lux) muestra un efecto poco relevante, con una variación mínima en la respuesta.

**Tabla 8 — 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			

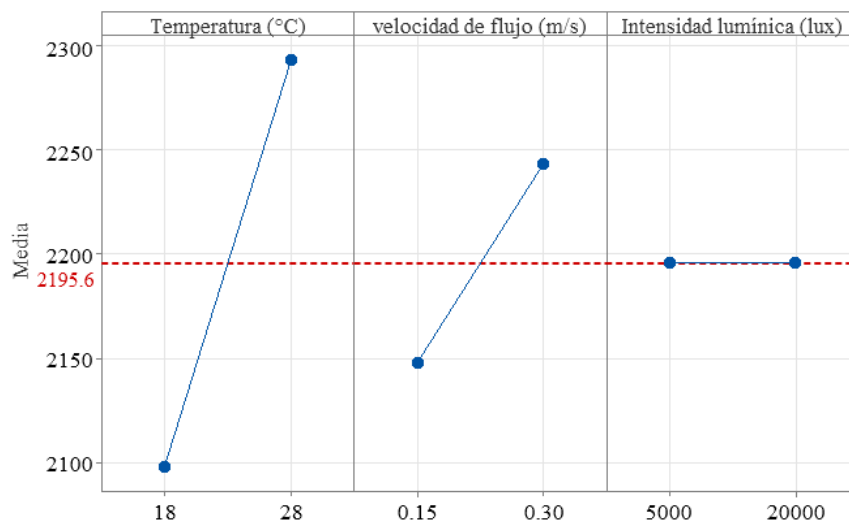
**Nota:** El ANOVA muestra que el modelo de regresión es altamente significativo ( $p < 0.001$ ,  $F = 218.17$ ), explicando casi toda la variabilidad en la respuesta (SC Regresión = 141994 de 143730). La temperatura ( $F = 528.39$ ,  $p = 0.000$ ) es el factor con mayor impacto, seguida por la velocidad 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.





**Figura 16 — Diagrama de Pareto de efectos para potasio (mg/100g)  $\alpha= 0.05$**

**Nota:** 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.



**Figura 17 — Gráfica de efectos principales para potasio (mg/100g)**



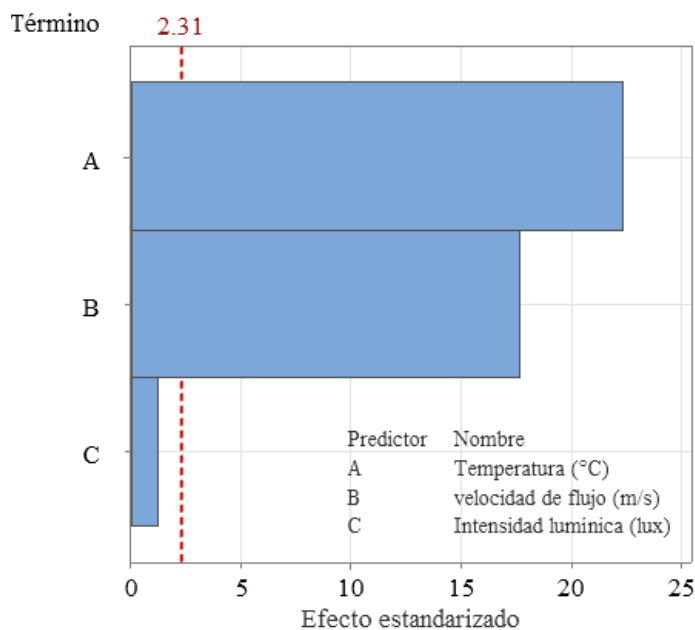
La gráfica de efectos principales muestra que la temperatura (°C) tiene el mayor impacto positivo en la concentración de potasio (mg/100g), aumentando significativamente al pasar de 18°C a 28°C. La velocidad de flujo (m/s) también incrementa la concentración de potasio al aumentar de 0.15 a 0.30 m/s, 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 9 — 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 (°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			

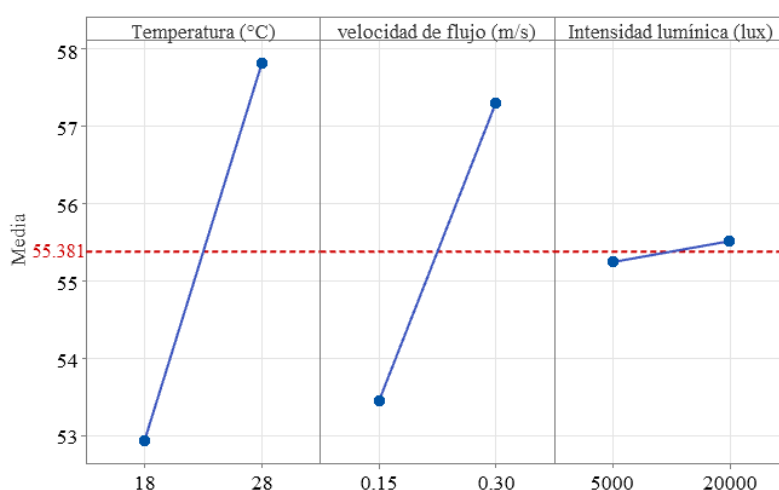
**Nota:** El ANOVA muestra que el modelo de regresión es altamente significativo ( $p < 0.001$ ,  $F = 270.50$ ), explicando casi toda la variabilidad en la respuesta (SC Regresión = 117.017 de 118.171). La temperatura ( $F = 499.17$ ,  $p = 0.000$ ) es el factor más influyente, seguida por la velocidad 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.





**Figura 18 — Diagrama de Pareto de efectos para calcio (mg/100g)  $\alpha = 0.05$**

**Nota:** 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.



**Figura 19 — Gráfica de efectos principales para calcio (mg/100g)**

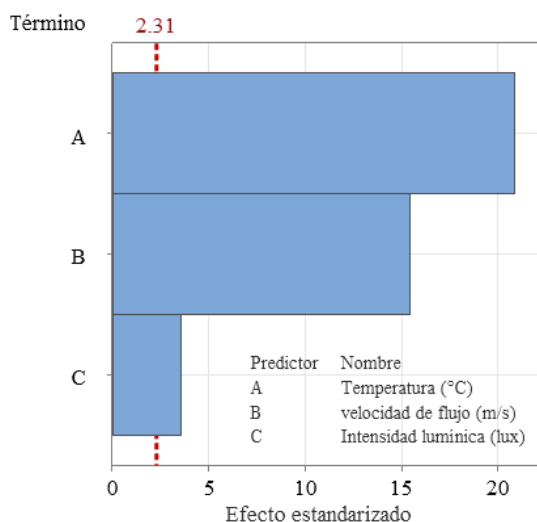
La gráfica de efectos principales muestra que la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) tiene el mayor impacto positivo en la concentración de calcio ( $\text{mg}/100\text{g}$ ), aumentando significativamente al pasar de  $18^{\circ}\text{C}$  a  $28^{\circ}\text{C}$ . La velocidad de flujo ( $\text{m}/\text{s}$ ) también incrementa la concentración de calcio al aumentar de  $0.15$  a  $0.30$   $\text{m}/\text{s}$ , aunque en menor medida. En contraste, la intensidad lumínica ( $\text{lux}$ ) 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 10 — Análisis predictivo de hierro ( $\text{mg}/100\text{g}$ ) 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 ( $^{\circ}\text{C}$ )	1	64.079	64.0794	435.84	0.000
velocidad de flujo ( $\text{m}/\text{s}$ )	1	34.918	34.9184	237.50	0.000
Intensidad lumínica ( $\text{lux}$ )	1	1.849	1.8487	12.57	0.008
Error	8	1.176	0.1470		
Total	11	102.023			

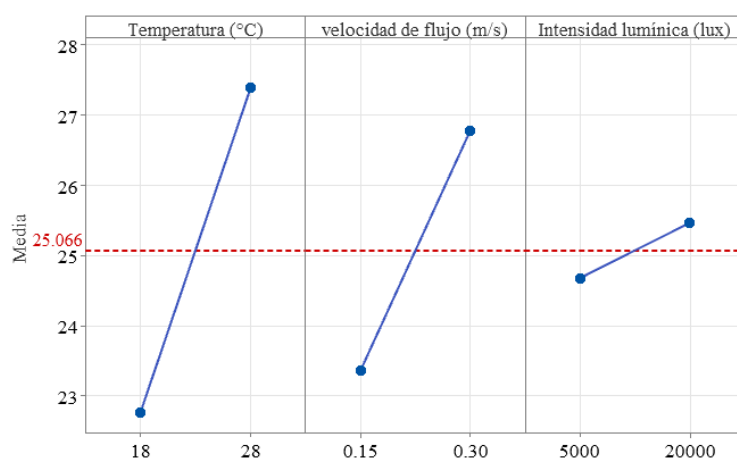
Nota: El ANOVA indica que el modelo de regresión es altamente significativo ( $p < 0.001$ ,  $F = 228.64$ ), explicando casi toda la variabilidad en la respuesta (SC Regresión = 100.846 de 102.023). La temperatura ( $F = 435.84$ ,  $p = 0.000$ ) es el factor con mayor impacto, seguida por la velocidad 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.





**Figura 20 — 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.



**Figura 21 — 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.

## 5.2 Contrastación de hipótesis

La contrastación de hipótesis en esta investigación se basa en el análisis de los factores tecnológicos (temperatura, velocidad de flujo e intensidad lumínica) sobre la producción de biomasa y la calidad nutricional de la espirulina (*Arthrospira platensis*). Se utilizó el ANOVA y regresión múltiple para evaluar la influencia estadística de cada variable independiente en la biomasa y en la concentración de proteínas y minerales.

### Planteamiento de Hipótesis

Se formulan las siguientes hipótesis nulas y alternativas para cada variable:

#### Para Temperatura ( $X_1$ )

- **Hipótesis nula ( $H_0$ ):** La temperatura no tiene un efecto significativo en la producción de biomasa y la composición nutricional de la espirulina.
- **Hipótesis alternativa ( $H_A$ ):** La temperatura tiene un efecto significativo en la producción de biomasa y la composición nutricional de la espirulina.

#### Para Velocidad de Flujo ( $X_2$ )

- **Hipótesis nula ( $H_0$ ):** La velocidad de flujo no tiene un efecto significativo en la producción de biomasa y la composición nutricional de la espirulina.
- **Hipótesis alternativa ( $H_A$ ):** La velocidad de flujo tiene un efecto significativo en la producción de biomasa y la composición nutricional de la espirulina.

#### Para Intensidad Lumínica ( $X_3$ )

- **Hipótesis nula ( $H_0$ ):** La intensidad lumínica no tiene un efecto significativo en la producción de biomasa y la composición nutricional de la espirulina.



- **Hipótesis alternativa (H<sub>A</sub>):** La intensidad lumínica tiene un efecto significativo en la producción de biomasa y la composición nutricional de la espirulina.

#### Selección del Método Estadístico

Dado que los datos cumplen con la normalidad ( $p > 0.100$ ) según las pruebas de Shapiro-Wilk, se aplicaron pruebas paramétricas, incluyendo:

- **ANOVA:** Para determinar el impacto de cada factor en la variabilidad de la biomasa y la composición nutricional.
- **Regresión Múltiple:** Para evaluar la relación entre temperatura, velocidad de flujo e intensidad lumínica con la biomasa y la concentración de proteínas y minerales.
- **Diagrama de Pareto y Gráfica de Efectos Principales:** Para visualizar la influencia de cada factor.

#### Resultados y Análisis de la Contrastación de Hipótesis

Los resultados obtenidos en el ANOVA y regresión múltiple muestran lo siguiente:

**Tabla 11 — Efecto sobre la Biomasa (g/L)**

Factor	Valor F	Valor p	Conclusión
Temperatura (°C)	4147.36	0.000	<b>Se rechaza H<sub>0</sub>.</b> La temperatura tiene un efecto significativo en la biomasa.
Velocidad de flujo (m/s)	1324.96	0.000	<b>Se rechaza H<sub>0</sub>.</b> La velocidad de flujo influye significativamente en la biomasa.
Intensidad lumínica (lux)	556.96	0.000	<b>Se rechaza H<sub>0</sub>.</b> La intensidad lumínica tiene un impacto significativo en la biomasa.

**Interpretación:** La temperatura es el factor más influyente en la producción de biomasa, seguida por la velocidad de flujo. La intensidad lumínica tiene un efecto negativo en valores superiores a 20,000 lux, reduciendo la producción de biomasa.



**Tabla 12 — Efecto sobre la Proteína (g/100g)**

Factor	Valor F	Valor p	Conclusión
Temperatura (°C)	70.43	0.000	<b>Se rechaza H<sub>0</sub></b> . La temperatura tiene un efecto significativo en la proteína.
Velocidad de flujo (m/s)	18.75	0.003	<b>Se rechaza H<sub>0</sub></b> . La velocidad de flujo influye en la proteína.
Intensidad lumínica (lux)	3.11	0.116	<b>No se rechaza H<sub>0</sub></b> . La intensidad lumínica no tiene un impacto significativo en la proteína.

**Interpretación:** La temperatura tiene el mayor impacto positivo en la concentración de proteínas, seguida por la velocidad de flujo. La intensidad lumínica no afecta significativamente la producción de proteínas.

**Tabla 13 — Efecto sobre Minerales (mg/100g)**

Mineral	Temperatura (ppp)	Velocidad de flujo (ppp)	Intensidad lumínica (ppp)	Conclusión
<b>Magnesio</b>	0.000 (S)	0.006 (S)	0.881 (NS)	La temperatura y la velocidad de flujo afectan significativamente el magnesio, la luz no.
<b>Fósforo</b>	0.000 (S)	0.000 (S)	0.998 (NS)	Temperatura y velocidad de flujo influyen en el fósforo, la luz no.
<b>Potasio</b>	0.000 (S)	0.000 (S)	0.998 (NS)	Temperatura y velocidad de flujo afectan el potasio, la luz no.
<b>Calcio</b>	0.000 (S)	0.000 (S)	0.250 (NS)	La intensidad lumínica no tiene un impacto significativo en el calcio.
<b>Hierro</b>	0.000 (S)	0.000 (S)	0.008 (S)	Todos los factores afectan significativamente el hierro.

**Interpretación:**

- Temperatura y velocidad de flujo son factores críticos en la concentración de minerales como magnesio, fósforo, potasio y calcio.
- La intensidad lumínica no afecta significativamente la mayoría de los minerales, excepto en el hierro, donde tiene una influencia moderada.

### Conclusión de contrastación de hipótesis

- Temperatura ( $X_1$ ) es el factor más influyente en la biomasa, proteínas y minerales. Se rechaza  $H_0$  en todas las pruebas ( $p=0.000$ ).
- Velocidad de flujo ( $X_2$ ) tiene un impacto positivo en la biomasa y en la calidad nutricional. Se rechaza  $H_0$  ( $p<0.01$ ).
- Intensidad lumínica ( $X_3$ ) afecta negativamente la biomasa en niveles superiores a 20,000 lux y no influye significativamente en la proteína. Se rechaza  $H_0$  para biomasa y hierro, pero se acepta  $H_0$  para proteínas y la mayoría de los minerales.

### 5.3 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°C a 28°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.



## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 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°C a 28°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°C a 28°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.



## 6.2 Recomendaciones

1. Optimizar la temperatura del cultivo dentro del rango ideal (25-30°C). Se demostró que la temperatura es el factor más determinante en la productividad y calidad de la biomasa. Se recomienda mantener el cultivo en un rango óptimo de 25-30°C para maximizar el crecimiento celular, la síntesis de proteínas y la concentración de minerales esenciales.
2. Regular la velocidad de flujo del medio de cultivo. La velocidad de flujo afecta la homogeneidad del cultivo y la absorción de nutrientes. Se recomienda mantener velocidades de 0.25 - 0.35 m/s en canales abiertos para evitar estancamientos, reducir la sedimentación y mejorar la captación de CO<sub>2</sub>, favoreciendo la eficiencia fotosintética.
3. Controlar la intensidad lumínica para evitar fotoinhibición. Se observó que intensidades lumínicas superiores a 20,000 lux generan efectos negativos en la biomasa y en la calidad proteica. Se recomienda utilizar sistemas de sombreado o regulación de luz artificial para mantener niveles adecuados de iluminación y evitar daño celular por estrés lumínico.
4. Implementar monitoreo continuo de los parámetros tecnológicos. Se sugiere la automatización del monitoreo de temperatura, flujo e iluminación con sensores en tiempo real para mantener condiciones óptimas y reducir la variabilidad en la producción.
5. Ajustar la composición del medio de cultivo para mejorar la biodisponibilidad de nutrientes. Se recomienda optimizar la relación N:P:K en el medio, asegurando un suministro adecuado de macronutrientes y oligoelementos como hierro, magnesio y calcio para potenciar el crecimiento y la calidad nutricional de la espirulina.
6. Evaluar estrategias de reducción del consumo energético. Se pueden implementar fuentes de energía renovable (paneles solares) y sistemas de recirculación eficiente del agua para minimizar costos operativos y mejorar la sostenibilidad del sistema de producción.
7. Aplicar estrategias de mejora en la cosecha y procesamiento. Para preservar la calidad de la biomasa y su composición bioquímica, se recomienda optimizar los métodos de cosecha mediante filtración eficiente y secado a baja temperatura, evitando la degradación de compuestos sensibles como la ficocianina.



## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABDUR RAZZAK, S.; BAHAR, K.; ISLAM, K.M.O.; QAEIDUL, H.; HANIFFA, A.K.; FARUQUE, M.O.; HOSSAIN, S.M.Z. y HOSSAIN, M.M. 2024.** Microalgae cultivation in photobioreactors: sustainable solutions for a greener future. *Green Chemical Engineering*, 5(4), 418–439. <https://doi.org/10.1016/j.gce.2023.10.004>.
- AKBARBAGLU, Z.; AYASEH, A.; GHANBARZADEH, B. y SARABANDI, K. 2022.** Techno-functional, biological and structural properties of *Spirulina platensis* peptides from different proteases. *Algal Research*, 66, 102755. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102755>.
- ALFADHLY, N.K.Z.; ALHELFI, N.; ALTEMIMI, A.B.; VERMA, D.K.; CACCIOLA, F. y NARAYANANKUTTY, A. 2022.** Trends and technological advancements in the possible food applications of spirulina and their health benefits: a review. *Molecules*, 27(17), 5584. <https://doi.org/10.3390/molecules27175584>.
- ALFADHLY, N.K.Z.; ALHELFI, N.; ALTEMIMI, A.B.; VERMA, D.K. y CACCIOLA, F. 2022.** Tendencias affecting the growth and cultivation of genus *Spirulina*: an investigative review on current trends. *Plants*, 11(22), 3063. <https://doi.org/10.3390/plants11223063>.
- BARRETO GONZÁLEZ, M.C. y CHEPE DELGADO, V.M. 2021.** Cultivo de *Spirulina platensis* en diferentes niveles de pH y rendimiento de proteínas. UNPRG-Institucional, 2021.
- BÉCHET, Q.; SHILTON, A. y GUIEYSSE, B. 2013.** Modeling the effects of light and temperature on algae growth: state of the art and critical assessment for productivity prediction during outdoor cultivation. *Biotechnology Advances*, 31(8), 1648–1663. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.08.014>.
- BORTOLINI, D.G.; MACIEL, G.M.; FERNANDES, I.A.A.; PEDRO, A.C.; RUBIO, F.T.V.; BRANCO, I.G. y HAMINIUK, C.W.I. 2022.** Functional properties of bioactive compounds from *Spirulina* spp.: current status and future trends. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 5, 100134. <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2022.100134>.
- BRENNAN, L. y OWENDE, P. 2010.** Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 557–577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009>.
- CHISTI, Y. 2007.** Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>.
- CHOTCHINDAKUN, K.; BUDDHASIRI, S. y KUNTANAWAT, P. 2024.** Enhanced growth and productivity of *Arthrospira platensis* H53 in a nature-like alkalophilic environment and its implementation in sustainable *Arthrospira* cultivation. *Sustainability*, 16(19), 8627. <https://doi.org/10.3390/su16198627>.
- COSTA, J.A.V.; FREITAS, B.C.B.; ROSA, G.M.; MORAES, L.; MORAIS, M.G. y MITCHELL, B.G. 2019.** Operational and economic aspects of *Spirulina*-based biorefinery. *Bioresource Technology*, 292, 121946. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121946>.



- DE JESUS, C.S.; DA SILVA UEBEL, L.; COSTA, S.S.; MIRANDA, A.L.; DE MORAIS, E.G.; DE MORAIS, M.G.; COSTA, J.A.V.; NUNES, I.L.; DE SOUZA FERREIRA, E. y DRUZIAN, J.I. 2018.** Outdoor pilot-scale cultivation of *Spirulina* sp. LEB-18 in different geographic locations for evaluating its growth and chemical composition. *Bioresource Technology*, 256, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.149>.
- GUIDI, F.; GOJKOVIC, Z.; VENULEO, M.; ASSUNÇÃO, P.A.C.J. y PORTILLO, E. 2021.** 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*, 9(8), 1333. <https://doi.org/10.3390/pr9081333>.
- HERNÁNDEZ SAMPIERI, R.; FERNÁNDEZ COLLADO, C. y BAPTISTA LUCIO, P. 2014.** Metodología de la investigación. España: ISBN: 978-1-4562-2396-0.
- JAKUBCZYK, K.; MELKIS, K.; DALEWSKI, B. y JANDA-MILCZAREK, K. 2024.** Assessment of antioxidant properties and mycotoxin profile of commercial spirulina supplements. *Food Bioscience*, 62, 105461. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105461>.
- KOTHAWALE, C.; VARMA, P. y KANDASUBRAMANIAN, B. 2024.** Innovations in biodegradable materials: harnessing *Spirulina* algae for sustainable biocomposite production. *Bioresource Technology Reports*, 28, 101965. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101965>.
- LADJAL-ETTOUMI, Y.; HAMADI, M.; HADJER DOUIK, L.; CHERIFI, Z. y NAZIR, A. 2024.** Physicochemical, functional, and nutraceutical properties of *Spirulina* and *Chlorella* biomass: a comparative study. *Algal Research*, 81, 103561. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103561>.
- LATAGAN, M.J.D.; NAGARAJAN, D.; HUANG, W.-M.; DE LUNA, M.D.G.; CHEN, J.-H.; ROLLON, A.P.; NG, I.-S.; LEE, D.-J. y CHANG, J.-S. 2024.** Bicarbonate-based microalgal cultivation technologies: mechanisms, critical strategies, and future perspectives. *Chemical Engineering Journal*, 502, 157998. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.157998>.
- LAURA HUAMAN, J.I. 2021.** 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 CO<sub>2</sub> atmosférico. Arequipa – Perú: Universidad Nacional de San Agustín.
- LUKAVSKÝ, J. 2000.** Vonshak, A. (Ed.): *Spirulina platensis* (*Arthrospira*). *Physiology, Cell Biology and Biotechnology. Photosynthetica*, 38(4), 552–552. <https://doi.org/10.1023/A:1012498515734>.
- LUPATINI MENEGOTTO, A.L.; SOUZA, L.E.S.; COLLA, L.M.; COSTA, J.A.V.; SEHN, E.; BITTENCOURT, P.R.S.; MORAES FLORES, É.L.; CANAN, C. y COLLA, E. 2019.** Investigation of techno-functional and physicochemical properties of *Spirulina platensis* protein concentrate for food enrichment. *LWT*, 114, 108267. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108267>.



- M. AHSAN, B.; HABIB, M.; PARVIN, M.; HUNTINGTON, T.C. y HASAN, M.R. 2008.** A review on culture, production and use of *Spirulina* as food for humans and feeds for domestic animals and fish. FAO. Roma, Italia.
- MADKOUR, F.F.; KAMIL, A.E.-W. y NASR, H.S. 2012.** Production and nutritive value of *Spirulina platensis* in reduced cost media. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 38(1), 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2012.09.003>.
- MAGWELL, P.F.R.; MINYAKA, E.; FOTSOP, O.W.; LENG, M.S. y LEHMAN, L.G. 2021.** Influence of sulphate nutrition on growth performance and antioxidant enzymes activities of *Spirulina platensis*. *Journal of Agricultural Science*, 13(10), 115. <https://doi.org/10.5539/jas.v13n10p115>.
- MEHAR, J.; SHEKH, A.U.; NETHRAVATHY, S.; SARADA, R.; CHAUHAN, V.S. y MUDLIAR, S. 2019.** Automation of pilot-scale open raceway pond: a case study of CO<sub>2</sub>-fed pH control on *Spirulina* biomass, protein and phycocyanin production. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 33, 384–393. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.07.006>.
- PRASETYO, A.; KHAERUNNISA, I.; VOLKANDARI, S.D.; YANO, A.A.; SHIDIQ, F.; HARYANTO, B.; FITRIANTO, N.A.; HANIM, C. y SUGIHARTO, S. 2024.** 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*, 10, 100940. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100940>.
- RAS, M.; STEYER, J.-P. y BERNARD, O. 2013.** Temperature effect on microalgae: a crucial factor for outdoor production. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 12(2), 153–164. <https://doi.org/10.1007/s11157-013-9310-6>.
- RAZZAK, S.A.; HOSSAIN, M.M.; LUCKY, R.A.; BASSI, A.S. y DE LASA, H. 2013.** Integrated CO<sub>2</sub> capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 622–653. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.063>.
- RICHMOND, A. 2004.** *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology*. Oxford.
- RONALD HUARACHI, U.; YAPO, U.; DUEÑAS, A.; SOTO, J. y GONZÁLEZ, R. 2013.** Producción de *spirulina platensis* (cyanophyta) en fotobioreactor tubular cónico bajo condiciones de laboratorio. *Tha Biologist*, 11(2), 217–227.
- SAHA, S.K. y MURRAY, P. 2018.** Exploitation of microalgae species for nutraceutical purposes: cultivation aspects. *Fermentation*, 4(2), 46. <https://doi.org/10.3390/fermentation4020046>.
- SALAMA, E.-S.; KURADE, M.B.; ABOU-SHANAB, R.A.I.; EL-DALATONY, M.M.; YANG, I.-S.; MIN, B. y JEON, B.-H. 2017.** Recent progress in microalgal biomass production coupled with wastewater treatment for biofuel generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1189–1211. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.091>.



- SHAH, M.A.R.; ZHU, F.; CUI, Y.; HU, X.; CHEN, H.; KAYANI, S.-I. y HUO, S. 2024.** Mechanistic insights into the nutritional and therapeutic potential of *Spirulina* (*Arthrospira*) spp.: challenges and opportunities. *Trends in Food Science & Technology*, 151, 104648. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104648>.
- SINETOVA, M.A.; KUPRIYANOVA, E.V. y LOS, D.A. 2024.** *Spirulina*/*Arthrospira* /*Limnospira* - Three names of the single organism. *Foods*, 13(17), 2762. <https://doi.org/10.3390/foods13172762>.
- SIRIKULRAT, K.; PEKKOH, J. y PUMAS, C. 2021.** Illumination system for growth and net energy ratio enhancement of *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis* outdoor cultivation in deep raceway pond. *Bioresource Technology Reports*, 14, 100661. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100661>.
- SOLETTO, D.; BINAGHI, L.; FERRARI, L.; LODI, A.; CARVALHO, J.C.M.; ZILLI, M. y CONVERTI, A. 2008.** Effects of carbon dioxide feeding rate and light intensity on the fed-batch pulse-feeding cultivation of *Spirulina platensis* in helical photobioreactor. *Biochemical Engineering Journal*, 39(2), 369–375. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2007.10.007>.
- SONI, R.A.; SUDHAKAR, K. y 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>.
- SLOUDAGAR, M.E.M.; KIONG, T.S.; JATHAR, L.; NIK GHAZALI, N.N.; RAMESH, S.; AWASARMOL, U. y ONG, H.C. 2024.** Perspectives on cultivation and harvesting technologies of microalgae, towards environmental sustainability and life cycle analysis. *Chemosphere*, 353, 141540. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141540>.
- SLOUDAGAR, M.E.M.; KIONG, T.S.; JATHAR, L.; NIK GHAZALI, N.N.; RAMESH, S.; AWASARMOL, U. y ONG, H.C. 2024.** Perspectives on cultivation and harvesting technologies of microalgae, towards environmental sustainability and life cycle analysis. *Chemosphere*, 353, 141540. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141540>.
- SPÍNOLA, M.P.; MENDES, A.R. y PRATES, J.A.M. 2024.** Chemical composition, bioactivities, and applications of *Spirulina* (*Limnospira platensis*) in food, feed, and medicine. *Foods*, 13(22), 3656. <https://doi.org/10.3390/foods13223656>.
- THEVARAJAH, B.; PIYATILLEKE, S.; NIMARSHANA, P.H.V.; KOUSHALYA, S.; MALIK, A. y ARIYADASA, T.U. 2024.** Exploring effective light spectral conversion techniques for enhanced production of *Spirulina*-derived blue pigment protein, *c*-phycoyanin. *Bioresource Technology*, 399, 130612. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130612>.
- TORZILLO, G. y VONSHAK, A. 2013.** Environmental stress physiology with reference to mass cultures. In: *Handbook of Microalgal Culture*. Wiley, 90–113.
- TORZILLO, G.; ZITTELLI, G.C.; SILVA BENAVIDES, A.M.; RANGLOVA, K. y MASOJIDEK, J. 2021.** Culturing of microalgae for food applications. In: *Cultured Microalgae for the Food Industry*. Elsevier, 1–48.



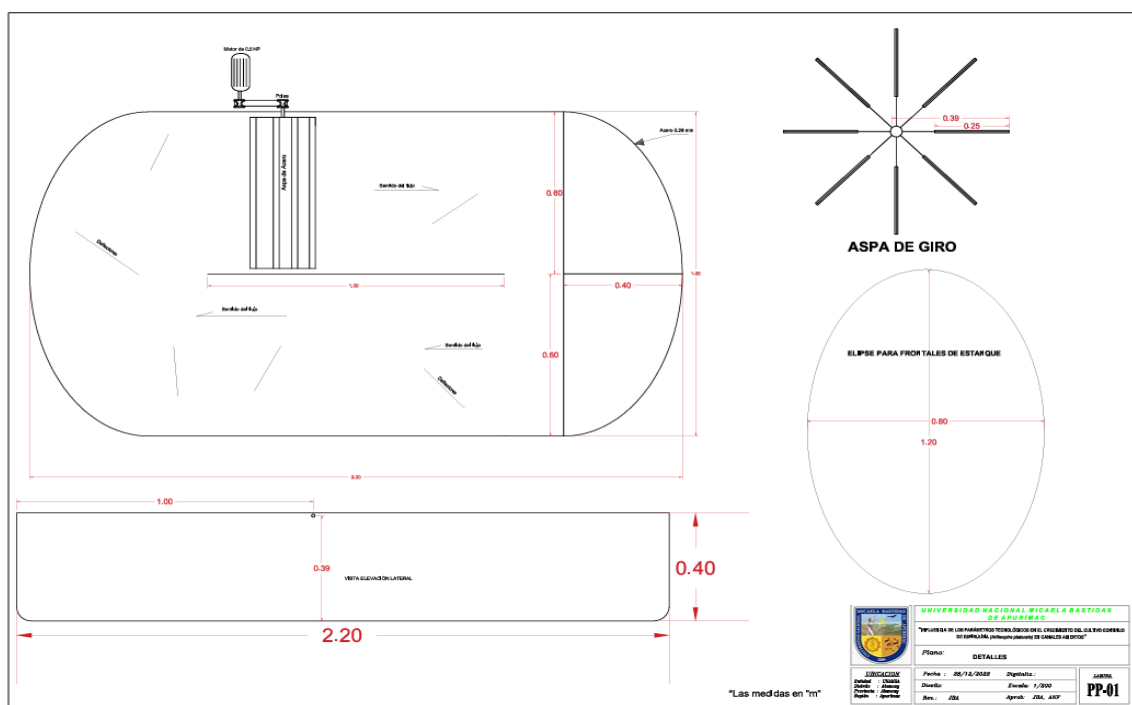
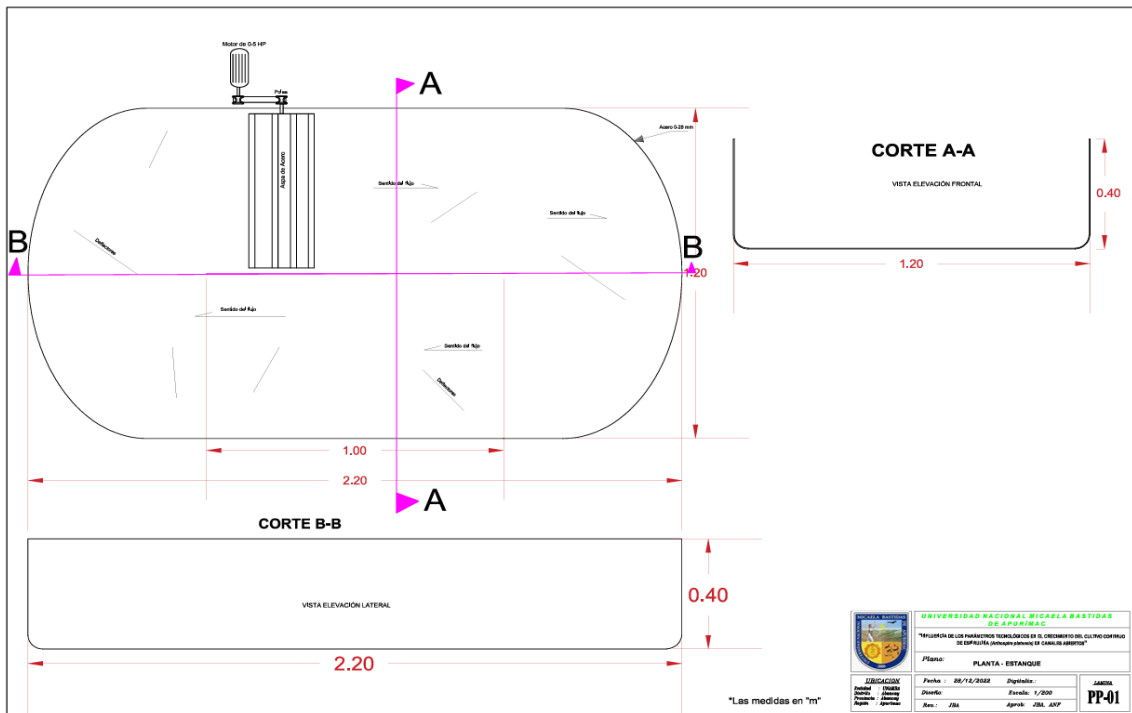
- USHARANI, G.; SARANRAJ, P.; KANCHANA, D. y NAGAR, A. 2012.** Spirulina cultivation: a review. *International Journal of Pharmaceutical & Biological Archive*, 2012.
- UZLASIR, T.; ISIK, O.; USLU, L.H.; SELLI, S. y KELEBEK, H. 2023.** Impact of different salt concentrations on growth, biochemical composition and nutrition quality of *Phaeodactylum tricornutum* and *Spirulina platensis*. *Food Chemistry*, 429, 136843. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136843>.
- VASQUEZ-VILLALOBOS, V.; VERGARAY, D.; SUAREZ, S.; VALLADARES, J.; ZAMORA, A.; GASPAS, K. y ESCURRA, X. 2010.** 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*, 2010, 199–209. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2014.04.04>.
- VILLARÓ-COS, S.; GUZMÁN SÁNCHEZ, J.L.; ACIÉN, G. y LAFARGA, T. 2024.** Research trends and current requirements and challenges in the industrial production of spirulina as a food source. *Trends in Food Science & Technology*, 143, 104280. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104280>.
- WAN, D.; WU, Q. y KUČA, K. 2021.** Spirulina. In: *Nutraceuticals*. Elsevier, 959–974.
- YE, C.; MU, D.; HOROWITZ, N.; XUE, Z.; CHEN, J.; XUE, M.; ZHOU, Y.; KLUTTS, M. y ZHOU, W. 2018.** Life cycle assessment of industrial scale production of spirulina tablets. *Algal Research*, 34, 154–163. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.07.013>.



## ANEXOS



### Anexo 1— Fotografías del diseño estructural del canal abierto de acero inoxidable



El diseño presentado corresponde a los planos de un estanque de acero inoxidable con capacidad de 700 litros, diseñado para simular un canal abierto con recirculación continua de agua. Su estructura está optimizada para garantizar una distribución uniforme de nutrientes, mantener la homogeneidad del medio de cultivo y mejorar la eficiencia en el crecimiento de la biomasa. Este sistema es ideal para estudios experimentales e industriales, permitiendo la evaluación y optimización de variables tecnológicas clave que influyen en la productividad del cultivo.



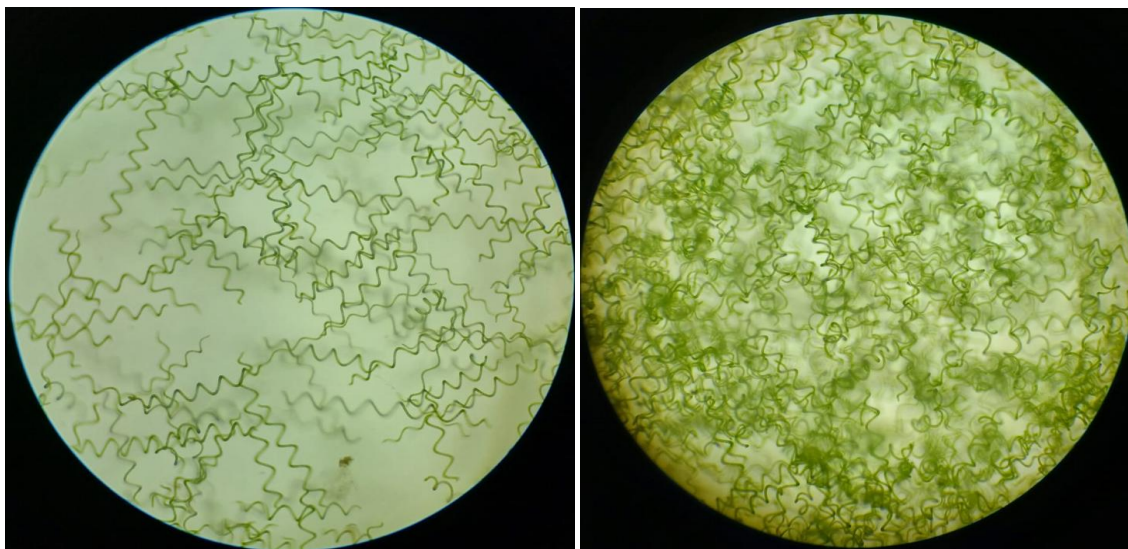


La imagen evidencia el proceso de supervisión realizado por los investigadores durante la construcción del estanque de acero inoxidable, diseñado específicamente para el cultivo controlado de espirulina. Este monitoreo es fundamental para garantizar la calidad estructural y operativa del sistema, asegurando que cumpla con los requisitos técnicos necesarios para el mantenimiento de un flujo continuo y la óptima distribución de nutrientes.



La imagen muestra el canal abierto completamente construido, diseñado para permitir la recirculación constante del flujo de agua, un aspecto fundamental en el cultivo optimizado de espirulina. Este sistema ha sido desarrollado para mantener condiciones homogéneas dentro del medio de cultivo, favoreciendo la distribución uniforme de nutrientes, el intercambio gaseoso eficiente y la estabilidad de los parámetros físico-químicos esenciales para el crecimiento de *Arthrospira platensis*.

## Anexo 2 — Registro fotográfico del cultivo de *Arthrospira platensis* en condiciones experimentales



Las fotografías muestran la identificación de *Arthrospira platensis*, evidenciando además el progreso y el incremento en la densidad poblacional del cultivo. Estas imágenes permiten visualizar la evolución del crecimiento de la espirulina, reflejando la eficacia de las condiciones de cultivo y la optimización de los parámetros tecnológicos empleados en el proceso.



La imagen muestra el canal abierto con un sistema de recirculación continua de agua, representando una fase inicial del cultivo de espirulina. En esta etapa, se observa un incremento progresivo de la biomasa, lo cual se refleja en la intensificación de la coloración verdosa del medio de cultivo. Este cambio cromático es un indicador visual del crecimiento celular de *Arthrospira platensis*, evidenciando una mayor concentración de organismos fotosintéticos. La recirculación del flujo de agua juega un papel fundamental en esta fase, ya que favorece la distribución homogénea de nutrientes, mejora la absorción de CO<sub>2</sub> y oxígeno, y optimiza la eficiencia fotosintética, asegurando así un desarrollo óptimo del cultivo.



La imagen muestra el cultivo de espirulina en su fase de máximo desarrollo, evidenciado por la intensa coloración verdosa del medio de cultivo dentro del canal abierto de acero inoxidable. Este cambio de tonalidad es un indicador visual del incremento en la biomasa, reflejando una alta concentración de *Arthrospira platensis* en el sistema. Además de la observación visual, se han realizado pruebas de laboratorio que confirman el crecimiento óptimo del cultivo, validando la eficiencia de las condiciones establecidas, como la recirculación del flujo de agua, el suministro adecuado de nutrientes y la regulación de la temperatura y la luz. Estos resultados demuestran el éxito del sistema en la producción sostenible de espirulina, asegurando su viabilidad tanto a nivel experimental como industrial.

### Anexo 3 — Evidencia fotográfica del proceso de cosecha de *Arthrospira platensis*



Las imágenes muestran el proceso de cosecha de espirulina, donde el cultivo ha sido filtrado a través de una manga con porosidad de 0.3 micras de diámetro, permitiendo la separación del medio líquido y la retención de la biomasa. Este método garantiza una recolección eficiente, asegurando la pureza del producto y minimizando la pérdida de material biológico.



En la imagen se observa la espirulina cosechada dispuesta en una bandeja de aluminio, lista para ser sometida a la fase de deshidratación en estufa. Este paso es fundamental para reducir el contenido de humedad de la biomasa, preservar su calidad nutricional y facilitar su almacenamiento y posterior procesamiento. La correcta ejecución de estas operaciones asegura la obtención de un producto de alta calidad, apto para su uso en aplicaciones alimentarias y biotecnológicas.

#### ***Anexo 4 — Documentación visual del proceso de deshidratación de la biomasa de espirulina***



La imagen de la izquierda muestra una estufa de marca Venticell, utilizada en el proceso de deshidratación de la espirulina. En este equipo, la biomasa fue sometida a una temperatura controlada de 60°C durante 48 horas, garantizando la eliminación eficiente de la humedad sin comprometer la calidad nutricional ni la integridad de los compuestos bioactivos, como la ficocianina y los ácidos grasos esenciales. Por otro lado, la imagen de la derecha exhibe las bandejas de aluminio utilizadas para la distribución homogénea de la biomasa de espirulina antes del proceso de deshidratación. La disposición uniforme evita la formación de abultamientos y asegura un secado equitativo y eficiente, favoreciendo una textura y calidad uniforme del producto final. Este procedimiento es crucial para obtener un producto estable, con mayor vida útil y adecuado para su posterior procesamiento en polvo o tabletas.



Las imágenes muestran la espirulina deshidratada dispuesta en bandejas de aluminio, observándose en forma de grumos como resultado del proceso de secado. La coloración verde oscuro es una característica distintiva de la biomasa deshidratada, atribuida a la alta concentración de pigmentos como la ficocianina y la clorofila, los cuales permanecen intactos debido al control adecuado de la temperatura durante la deshidratación. La acumulación de las muestras en la bandeja influye en la intensidad del color, reflejando la densidad y pureza del producto obtenido. Este estado sólido facilita su posterior procesamiento en polvo o tabletas, asegurando un producto final con alta calidad nutricional y estabilidad para su almacenamiento y comercialización.

#### **Anexo 5 — Fotografías del procedimiento de molienda de espirulina deshidratada**



La imagen muestra el proceso de molienda de la espirulina deshidratada, llevado a cabo en un molino eléctrico Nima con una potencia de 150 W. Este equipo posee una capacidad de molienda de 50 gramos por ciclo y opera a una velocidad de 14,500 rpm, lo que permite la reducción eficiente del tamaño de partícula y la obtención de un polvo fino y homogéneo. Este proceso es fundamental para mejorar la solubilidad y biodisponibilidad de la espirulina, facilitando su uso en diversas aplicaciones, como suplementos alimenticios, formulaciones nutraceuticas y productos cosméticos. Además, la molienda controlada evita la degradación térmica de los compuestos bioactivos, preservando su valor nutricional y funcionalidad.

## Anexo 6 — Imágenes de las muestras de espirulina utilizadas en el estudio



Las imágenes muestran la disposición final de las muestras de espirulina en polvo, almacenadas en frascos de vidrio previamente higienizados para garantizar su conservación óptima durante el transporte hasta el laboratorio. El uso de envases de vidrio es fundamental para preservar la calidad del producto, ya que protege la biomasa deshidratada de factores ambientales como la humedad, la luz y la oxidación, evitando la degradación de sus propiedades nutricionales y bioactivas. Este procedimiento asegura que las muestras lleguen en condiciones óptimas para su posterior análisis fisicoquímico y microbiológico, permitiendo una evaluación precisa de su composición y calidad.

**Anexo 7 — Resultados detallados del análisis químico de la biomasa de espirulina**



**LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS**  
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
*Instituto de Certificación, Inspección y Ensayos*



**INFORME DE ENSAYOS**  
**N° 000825-2024**

**SOLICITANTE** : UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURIMAC  
**DIRECCIÓN LEGAL** : AV. INCA GARCILAZO DE LA VEGA NRO. S/N (CARRE PANAMERICANA ABANCA Y CUSCO KM 5) APURIMAC - ABANCA Y - TAMBURCO  
RUC: 20527056579 Teléfono : 948555516

**PRODUCTO** : **ESPIRULINA**  
**NUMERO DE MUESTRAS** : Uno  
**IDENTIFICACIÓN/MTRA** : LOTE: 001  
FP: 13 DE FEBRERO 2024

**CANTIDAD RECIBIDA** : 1393,3 g (+envase) de muestra proporcionada por el solicitante.  
**MARCA(S)** : S.M.

**FORMA DE PRESENTACIÓN** : Envasado, la muestra ingresa en bolsa sellada, a temperatura ambiente.  
**SOLICITUD DE SERVICIOS** : S/S N°EN- 000473 -2024  
**REFERENCIA** : ACEPTACION TELEFONICA  
**FECHA DE RECEPCIÓN** : 19/02/2024  
**ENSAYOS SOLICITADOS** : **FÍSICO / QUÍMICO**  
**PERÍODO DE CUSTODIA** : No aplica

**RESULTADOS:**

**ENSAYOS FÍSICOS / QUÍMICOS:**  
**ALCANCE:** N.A.

ENSAYOS	PROMEDIO	RESULTADO 1	RESULTADO 2
1.- Humedad (g/100 g de muestra original)	80,1	80,10	80,10
2.- Grasa (g/100 g. de muestra original)	1,3	1,30	1,30
3.- Cenizas (g/100 g. de muestra original)	1,9	1,98	1,90
4.- % Kcal. proveniente de Carbohidratos	3,6	---	---
5.- % Kcal. proveniente de Grasa	14,9	---	---
6.- % Kcal. proveniente de Proteínas	81,5	---	---
7.- Energía Total (Kcal/100 g de muestra original)	78,5	---	---
8.- Carbohidratos (g/100 g de muestra original)	0,7	---	---
9.- Proteína (g/100 g. de muestra original) (Factor : 6,25)	16,0	16,01	16,02
10.- Sodio (Partes por millón)	1956,6	1965,30	1947,86
11.- Magnesio (Partes por millón)	1497,0	1507,98	1486,09
12.- Fósforo (Partes por millón)	2645,4	2648,86	2641,91
13.- Potasio (Partes por millón)	2221,7	2214,81	2228,62
14.- Calcio (Partes por millón)	708,1	708,71	707,48
15.- Hierro (Partes por millón)	369,5	567,58	371,40
16.- Zinc (Partes por millón)	4,3	4,16	4,38

**MÉTODOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO:**  
1.- AOAC 925.10 Cap. 32, Pág. 1, 21st Edition 2019  
2.- AOAC 922.06 Cap. 32, Pág. 5, 21st Edition 2019  
3.- AOAC 930.05 Cap. 3, Pág. 1, 21st Edition 2019  
4.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993  
5.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993  
6.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993  
7.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993

CONTINÚA INFORME DE ENSAYOS N° 000825-2024 Pág. 1/2

Av. La Molina S/N (frente a la puerta principal de la Universidad Agraria) - La Molina - Lima - Perú  
Cel.: 998376789 - 998373909 - 926694322  
E-mail: imcfl.ventas.servicios@lamolina.edu.pe - Página Web: www.lamolina.edu.pe/calidadtotal  
 la molina calidad total





## LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

Instituto de Certificación, Inspección y Ensayos



### INFORME DE ENSAYOS

N° 000825- 2024

- 8 - Por Diferencia MS-INN Collazos 1993
- 9 - AOAC 920.152 Cap. 37, Pág. 10, 21st Edition 2019
- 10 - AOAC 973.54 Cap. 11, Pág. 20-21, 21st Edition 2019
- 11 - AOAC 975.03 Cap. 3, Pág. 3-4, 21st Edition 2019
- 12 - AOAC 970.39 Cap. 37, Pág. 8-9, 21st Edition 2019
- 13 - AOAC 975.03 Cap. 3, Pág. 3-4, 21st Edition 2019
- 14 - AOAC 975.03 Cap. 3, Pág. 3-4, 21st Edition 2019
- 15 - AOAC 974.27 Cap. 11, Pág. 16-18, 21st Edition 2019
- 16 - AOAC 975.03 Cap. 3, Pág. 5-6, 21st Edition 2019

FECHA DE EJECUCION DE ENSAYOS: Del 20/02/2024 Al 29/02/2024.

**ADVERTENCIA:**

- 1 - El muestreo, las condiciones de muestreo, tratamiento y transporte de la muestra hasta su ingreso a La Molina Calidad Total - Laboratorios son de responsabilidad del Solicitante.
- 2 - Se prohíbe la reproducción parcial o total del presente Informe sin la autorización de La Molina Calidad Total - Laboratorios.
- 3 - Valido sólo para la cantidad recibida. No es un certificado de Conformidad ni Certificado del Sistema de Calidad de quien lo produce.

La Molina, 29 de Febrero de 2024



LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS - UNAMBA

*Flavio Sosa*  
Biol. Lourdes Margarita Marco Saldaña  
Dirección Técnica (e)  
CEP - N° 01232

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

Pág. 22

Av. La Molina S/N (frente a la puerta principal de la Universidad Agraria) - La Molina - Lima - Perú

Cel.: 998376789 - 998373909 - 926694322

E-mail: [imclf.ventas.servicios@lamolina.edu.pe](mailto:imclf.ventas.servicios@lamolina.edu.pe) - Página Web: [www.lamolina.edu.pe/calidadtotal](http://www.lamolina.edu.pe/calidadtotal)

la molina calidad total





**LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS  
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

*Instituto de Certificación, Inspección y Ensayos*



**INFORME DE ENSAYOS**

**N° 001643-2024**

**SOLICITANTE :** UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURIMAC  
**DIRECCIÓN LEGAL :** AV. INCA GARCILAZO DE LA VEGA NRO. S/N (CARRE PANAMERICANA ABANCA Y CUSCO KM 5) APURIMAC - ABANCA Y - TAMBURCO  
**RUC :** 20527056579 **Teléfono :** 948555516

**PRODUCTO :** MICROALGA ESPIRULINA (*Arthrospira platensis*)  
**NUMERO DE MUESTRAS :** Uno  
**IDENTIFICACIÓN/MTRA :** S.I.  
**CANTIDAD RECIBIDA :** 790,2 g (\*envase) de muestra proporcionada por el solicitante.  
**MARCA(S) :** S.M.  
**FORMA DE PRESENTACIÓN :** Envasado, la muestra ingresa en bolsa sellada.  
**SOLICITUD DE SERVICIOS :** S/S N°EN- 001071 -2024  
**REFERENCIA :** ACEPTACION TELEFONICA  
**FECHA DE RECEPCIÓN :** 16/04/2024  
**ENSAYOS SOLICITADOS :** FÍSICO / QUÍMICO  
**PERÍODO DE CUSTODIA :** No aplica

**RESULTADOS:**

**ENSAYOS FÍSICOS / QUÍMICOS:**

**ALCANCE: N.A.**

ENSAYOS	PROMEDIO	RESULTADO 1	RESULTADO 2
1.- Humedad (g/100 g de muestra original)	16,0	15,94	16,09
2.- Grasa (g/100 g de muestra original)	1,6	1,62	1,62
3.- Cenizas (g/100 g de muestra original)	11,9	11,89	11,93
4.- % Kcal. proveniente de Carbohidratos	19,0	---	---
5.- % Kcal. proveniente de Grasa	4,9	---	---
6.- % Kcal. proveniente de Proteínas	76,1	---	---
7.- Energía Total (Kcal/100 g de muestra original)	296,4	---	---
8.- Carbohidratos (g/100 g de muestra original)	14,1	---	---
9.- Proteína (g/100 g de muestra original) (Factor:5,25)	56,4	56,35	56,42
10.- Sodio (mg / 100 g. de muestra original)	4082,0	4088,13	4075,78
11.- Magnesio (mg / 100 g. de muestra original)	305,3	308,51	302,15
12.- Fósforo (mg / 100 g. de muestra original)	1191,7	1191,88	1191,52
13.- Potasio (mg / 100 g. de muestra original)	2319,2	2352,04	2286,39
14.- Calcio (mg / 100 g. de muestra original)	59,1	59,89	58,28
15.- Hierro (mg / 100 g. de muestra original)	28,7	28,75	28,62
16.- Zinc (mg / 100 g. de muestra original)	1,2	1,18	1,15

**MÉTODOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO:**

- 1.- AOAC 930.04 Cap. 3, Pág. 1, 21st Edition 2019
- 2.- AOAC 930.09 Cap. 3, Pág. 28, 21st Edition 2019
- 3.- AOAC 930.05 Cap. 3, Pág. 1, 21st Edition 2019
- 5.- Por Cálculo MS-INN Collazos. 1993

CONTINÚA INFORME DE ENSAYOS N° 001643-2024

Pág. 1/2

Av. La Molina S/N (frente a la puerta principal de la Universidad Agraria) - La Molina - Lima - Perú  
 Cel.: 998376789 - 998373909 - 926694322

E-mail: [lmcti.ventas.servicios@lamolina.edu.pe](mailto:lmcti.ventas.servicios@lamolina.edu.pe) - Página Web: [www.lamolina.edu.pe/calidadtotal](http://www.lamolina.edu.pe/calidadtotal)

la molina calidad total



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA





## LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

*Instituto de Certificación, Inspección y Ensayos*



### INFORME DE ENSAYOS

N° 001643-2024

- 6.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993
- 7.- Por Cálculo MS-INN Collazos 1993
- 8.- Por Diferencia MS-INN Collazos 1993
- 9.- AOAC 978.04(A) Cap. 3, Pág. 28, 21st Edition 2019
- 10.- AOAC 973.54 Cap. 11, Pág. 20-21, 21st Edition 2019
- 11.- AOAC 975.03 Cap. 3, Pág. 3-4, 21st Edition 2019
- 12.- AOAC 970.39 Cap. 37, Pág. 8-9, 21st Edition 2019
- 13.- AOAC 975.03 Cap. 3, Pág. 3-4, 21st Edition 2019
- 14.- AOAC 975.03 Cap. 3, Pág. 3-4, 21st Edition 2019
- 15.- AOAC 974.27 Cap. 11, Pág. 16-18, 21st Edition 2019
- 16.- AOAC 975.03 Cap. 3, Pág. 5-6, 21st Edition 2019

FECHA DE EJECUCION DE ENSAYOS: Del 16/04/2024 Al 26/04/2024.

#### ADVERTENCIA:

- 1.- El muestreo, las condiciones de muestreo, tratamiento y transporte de la muestra hasta su ingreso a La Molina Calidad Total Laboratorios-UNALM son responsabilidad del solicitante.
- 2.- La Molina Calidad Total Laboratorios-UNALM es responsable de toda la información suministrada en el informe de ensayos, excepto la información suministrada por el solicitante que pueda o no afectar a la validez de los resultados.
- 3.- Los resultados se aplican únicamente a la muestra recibida. No es un Certificado de Conformidad, ni Certificado del Sistema de Calidad de quien lo produce.
- 4.- Se prohíbe la reproducción parcial o total del presente Informe sin autorización de La Molina Calidad Total Laboratorios-UNALM.

La Molina, 26 de Abril de 2024



LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS-UNALM  
Biol. Jorge Antonio Chávez Pérez  
Director Ejecutivo (e)  
CBP - N° 2503

Pág. 2/2

Av. La Molina S/N (frente a la puerta principal de la Universidad Agraria) - La Molina - Lima - Perú  
Cel.: 998376789 - 998373909 - 926694322

E-mail: [lmctl.ventas.servicios@lamolina.edu.pe](mailto:lmctl.ventas.servicios@lamolina.edu.pe) - Página Web: [www.lamolina.edu.pe/calidadtotal](http://www.lamolina.edu.pe/calidadtotal)

la molina calidad total

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

