

Determinación de la Taza Interna de Retorno de la producción de proteína a partir de la captura de dióxido de carbono de biogás

Determination of the Internal Rate of Return (IRR) for Protein Production via Carbon Dioxide Capture from Biogas

Villalobos Canchola, Mariana¹, Becerra Cervera, Jesús², Gutierrez Vargas, Santiago³

¹ Ingeniería en Biotecnología, Campus Celaya-Salvatierra, Universidad de Guanajuato.

² Posgrado en Biociencias, División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato, Universidad de Guanajuato.

³ Ingeniería en Química sustentable, División de Ciencias e Ingenierías, Campus Celaya Salvatierra, Universidad de Guanajuato.

s.gutierrez@ugto.mx³

Resumen

Se diseñaron 3 prototipos de captura de CO₂ que emplearon soluciones NaOH para atrapar el CO₂ generando posteriormente un medio de cultivo tipo Zarrouk modificado, en el cual se inoculó *A. platensis*. Se realizaron cinéticas de crecimiento para evaluar el comportamiento del microorganismo bajo estas condiciones. En la primera prueba, se observó la muerte temprana de la biomasa debido a un pH elevado y temperatura superior al óptimo. En pruebas subsecuentes, se ajustaron variables como concentración de NaOH, flujo de gas, y condiciones de iluminación, obteniendo una ligera mejora en las células. Sin embargo, se detectaron problemas asociados al desequilibrio iónico y formación de carbonatos, lo que afectó el crecimiento de *A. platensis*. Este estudio proporciona información clave sobre los retos y oportunidades en el diseño de sistemas sostenibles de cultivo de cianobacterias acoplados a procesos de captura de CO₂.

Palabras clave: biogás; captura de CO₂; *A. platensis*.

Introducción

Arthrospira platensis es una cianobacteria filamentosa conocida como espirulina, es de gran interés en muchos ámbitos debido a sus diversas y destacadas propiedades nutricionales y funcionales, además, tiene la capacidad de crecer en medios alcalinos. Su cultivo requiere condiciones específicas de pH, temperatura, iluminación y nutrientes, las cuales influyen directamente en su crecimiento y productividad (Ismail et al., 2016) (T. Nghinaunye et al., 2023) (Chaiklahan et al., 2021).

El presente proyecto se enfocó en el diseño y elaboración de un sistema de captura de dióxido de carbono (CO₂), el cual es un gas de efecto invernadero, y su aprovechamiento como medio de cultivo para *A. platensis*, así como la evaluación de la viabilidad de crecimiento de esta cianobacteria en este medio modificado.

Metodología

Se diseñaron y construyeron 3 prototipos para la captura de dióxido de carbono (CO₂) y posteriormente el cultivo de la cianobacteria *Arthrospira platensis* en los medios con el CO₂ capturado, simultáneamente se evaluó el crecimiento de *A. platensis* en estos medios. El primer prototipo consistió en una bolsa de almacenamiento de 100 L para el CO₂, una bomba, un medidor de gas y cuatro vasos de plástico de 380 ml que contenían una solución de hidróxido de sodio (NaOH) para capturar el CO₂; para el arranque del primer prototipo se llenó la bolsa con 40 L de CO₂ y se recirculó 4 veces a través de los vasos con solución de NaOH 1.818 M. Después la solución se complementó para crear un medio Zarrouk modificado, donde se inoculó la cianobacteria. Una segunda prueba se hizo con una solución de NaOH 0.0010 M y 10 L de CO₂. Para el segundo prototipo se reutilizó la bolsa de CO₂ del primer prototipo, pero el sistema se modificó para incluir una columna de lavado de gas y una cámara de recuperación; para el arranque del segundo prototipo se

mezclaron 20 L de CO_2 con 20 L de aire, y la mezcla de gases se hizo pasar a través de una columna de lavado que contenía 1 L de solución de NaOH 0.01 M a un flujo de 0.03 L/min. El tercer prototipo fue un fotobiorreactor diseñado para el cultivo de *A. platensis*, construido con un tubo de PVC, tiras de luces LED y un sistema de aireación; para el arranque del tercer prototipo se realizaron cinéticas de crecimiento de *A. platensis* en medio Zarrouk estándar.

Se emplearon varias técnicas para monitorear las condiciones de las soluciones y los cultivos y para evaluar la viabilidad del crecimiento de *A. platensis* en los medios de cultivo modificados. Entre las técnicas se encuentran: titulación con fenolftaleína y naranja de metilo para la determinación de carbonatos y bicarbonatos en las soluciones, cinéticas de crecimiento en las que se realizaron mediciones de la densidad óptica (DO) del medio de cultivo con *A. platensis*, y se utilizó el método de desplazamiento de líquidos con una solución de NaOH 2 M para determinar la concentración de CO_2 en la mezcla de gases.

Diseño del primer prototipo de captura de CO_2

El diseño del primer prototipo de captura de CO_2 consistió en una bolsa de almacenamiento de CO_2 , una bomba, un medidor de gas que trabaja a un flujo de 12 L/min, y 4 vasos de plástico con tapa de 380 ml de capacidad. Todos los componentes del prototipo mencionados anteriormente fueron conectados entre sí con manguera.

Se comenzó por la construcción de la bolsa de almacenamiento de CO_2 de 100 L de capacidad elaborada a partir de geomembrana de PVC de 1.5 mm de espesor. Se colocaron 2 bridas en la bolsa de almacenamiento de geomembrana, una para la salida de CO_2 de la bolsa y otra para la entrada de CO_2 no capturado por la solución en los vasos de plástico. Se sellaron los bordes de la bolsa con una pistola de aire caliente, y finalmente se realizó una prueba neumática para la verificación de fugas, para esto, se llenó la bolsa de aire completamente y se roció agua con jabón, las zonas donde hubo formación de burbujas se reforzaron con un parche.

La bolsa de geomembrana almacena el CO_2 que es tomado por acción de la bomba, posteriormente el CO_2 ingresa al medidor de gas y sale de este para ingresar a los vasos que contienen una solución de NaOH para capturar el CO_2 de la mezcla, el CO_2 no capturado ingresa nuevamente a la bolsa de almacenamiento de CO_2 . Finalmente se construyó una estructura de madera para disponer de los componentes del prototipo verticalmente.

Arranque del primer prototipo de captura de CO_2

La bolsa de almacenamiento de CO_2 se llenó con 40 L, los cuales fueron suministrados a los 4 vasos que contenían 250 ml de solución de NaOH 1.818 M (72.72 g/L) cada uno. El volumen de CO_2 fue recirculado 4 veces y al finalizar el suministro de CO_2 se midió el pH de las soluciones en los frascos individualmente y de la solución total (volumen de los 4 frascos). Finalmente, se complementó la solución total con los reactivos necesarios (excepto bicarbonato) para la obtención de medio Zarrouk donde se inoculó *Arthrospira platensis*.

Se realizó una cinética de crecimiento de *Arthrospira platensis* para observar su comportamiento en este medio de cultivo modificado. *Arthrospira platensis* no logró sobrevivir en el medio descrito anteriormente, por lo tanto, se realizó una segunda prueba en este prototipo, esta vez con menor concentración de NaOH en la solución. Para la segunda prueba se realizó el mismo procedimiento descrito anteriormente, pero esta vez utilizando una solución de NaOH 0.0010 M (0.04 g/L).

Diseño del segundo prototipo de captura de CO_2

El diseño del prototipo de captura de CO_2 consistió en una bolsa de almacenamiento de CO_2 (se reutilizó la bolsa construida para el primer prototipo), una bomba, una columna de lavado de gas, y finalmente una cámara para capturar el gas purificado. Todos los componentes del prototipo mencionados anteriormente fueron conectados en serie con manguera. La bolsa de geomembrana almacena el CO_2 que es captado de la bolsa por acción de la bomba, posteriormente la mezcla de CO_2 y aire ingresa a la columna de lavado de gases que contiene una solución de NaOH para capturar el CO_2 de la mezcla. Enseguida, el gas lavado fue

almacenado para su posterior análisis. Se utilizó la misma estructura de madera construida para el primer prototipo para disponer de los componentes de manera vertical.

Arranque del segundo prototipo de captura de CO₂

Se realizó una mezcla de gases compuesta por 20 L a presión ambiente de CO₂ y 20 L de aire. Para corroborar la concentración de la mezcla de gases se tomó una muestra de la mezcla de gases y se realizó el método de desplazamiento de líquidos usando una solución de NaOH 2 M, corroborando así la concentración de la mezcla de gases. La mezcla de gases se hizo pasar por una columna de lavado de gases a un flujo de 0.03 L/min, la columna de lavado tenía una capacidad de 1 L, para realizar la captura de CO₂ en la columna se utilizó 1 L de solución de NaOH 0.01 M (Sabir et al. 2025). Se tomaron muestras de la solución y del gas cada 4 minutos hasta alcanzar un pH de 6 en la solución y determinar la concentración de la mezcla de gas.

Como en el prototipo anterior, al finalizar el suministro de CO₂ a la solución, esta se complementó con los reactivos necesarios (excepto bicarbonato) para la obtención de medio Zarrouk donde se inoculó *Arthrospira platensis* y se realizó una cinética de crecimiento de *Arthrospira platensis* para observar su comportamiento en este medio de cultivo modificado.

Tercer prototipo para cultivo de *Arthrospira platensis*

El objetivo de la construcción de este tercer prototipo fue construir un fotobiorreactor para el cultivo de *A. platensis*, consistió en un tubo de PVC con tiras de luces LED en su interior que proveen alrededor de 10,100 luxes y una temperatura de 36 ± 4 °C en su interior dependiendo de la distancia a la que se encuentre de las paredes del fotobiorreactor, aumentando mientras más cerca se esté de ellas. Se provee de mangueras conectadas a una bomba para suministrar aireación a los frascos con medio de cultivo dentro de este fotobiorreactor.

Determinación de concentración de CO₂ por el método de desplazamiento de líquidos

Se tomaron 30 ml de la mezcla de gases y se hicieron pasar por una solución de NaOH 2 M, el volumen de líquido desplazado corresponde al volumen de gas no capturado por la solución. Es decir, el volumen en la probeta representa el volumen de aire.

Técnica de determinación de carbonatos y bicarbonatos

Se tomaron 5 ml de la muestra problema y se le añadieron 30 ml de agua destilada. Posteriormente se le adicionaron 3 gotas de fenolftaleína y en caso de observar un viraje a rosa se procedió a titular con HCL 0.02 N hasta virar a transparente y se reportó el volumen de HCL gastado (este valor de volumen corresponde a V₁ en los cálculos). A la muestra ya titulada se le agregaron 3 gotas de naranja de metilo y se tituló con HCL 0.02 N hasta virar de amarillo a naranja, se reportó el volumen gastado el cual corresponde a V₂. En caso de no ocurrir el viraje a rosa al agregar la fenolftaleína, se procede a la adición de las 3 gotas de naranja de metilo.

Las fórmulas usadas para el cálculo de carbonatos y bicarbonatos fueron las siguientes:

$$\text{Concentración de carbonato } (CO_3^{2-}) \left[\frac{\text{meq}}{\text{L}} \right] = \frac{V_1(0.98)(40)}{V'} \quad \text{Ec. 1}$$

$$\text{Concentración de bicarbonato } (HCO_3^-) \left[\frac{\text{meq}}{\text{L}} \right] = \frac{(V_2 - V_1)(0.98)(20)}{V'} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

V₁ = valor en ml del HCL 0.02 N usado en la valoración de CO₃²⁻.

V₂ = valor en ml de HCL 0.02 N usado en la valoración de HCO₃⁻.

V' = valor en ml de la muestra problema.

Cinética de crecimiento de *Arthrospira platensis*

Se realizó la cinética de crecimiento de *A. platensis* en medio Zarrouk estándar y en la solución burbujeada con CO₂ resultante a condiciones de pH del medio de 9, temperatura de aproximadamente $36 \pm 4^\circ\text{C}$, aireación e iluminación constante en el fotobiorreactor (tercer prototipo). Se realizó un cálculo para obtener un litro de medio Zarrouk con 0.1 de DO 560 nm, el cual fue inoculado con un volumen de cultivo madre de *A. platensis* determinado para conseguir DO 560 nm de 0.1. Posteriormente se distribuyó el litro de medio de cultivo con *A. platensis* en 3 frascos que se introdujeron en el fotobiorreactor y se realizaron mediciones de densidad óptica a 560 nm cada 24 hrs para realizar una cinética de crecimiento.

RESULTADOS

Primer prototipo de captura de CO₂

El pH inicial de la solución de NaOH a 1.8 M del prototipo 1, figura 1, antes de suministrarle CO₂ fue de aproximadamente 14. El volumen de CO₂ suministrado fue de 40 L y se recirculó 4 veces. Finalizado el suministro de CO₂ se midió el pH de los 4 vasos, los valores fueron 10.53, 10.70, 11.83 y 12.22 para los vasos 1, 2, 3 y 4 respectivamente. El pH de la solución total (volumen de los 4 vasos juntos) fue de 10.79. Esta solución se complementó con las sales necesarias para convertirla en medio Zarrouk, posteriormente se inoculó *Arthrospira platensis* y se realizó una cinética de crecimiento.

El valor de DO 560 nm del medio Zarrouk inoculado se ajustó a un valor de 0.1 para comenzar, este fue el valor en el día 0. Lamentablemente, no fue posible continuar con las mediciones de DO debido a que se tornaron transparentes las células de *Arthrospira platensis* al día siguiente de ser inoculada como se muestra en la figura 2.

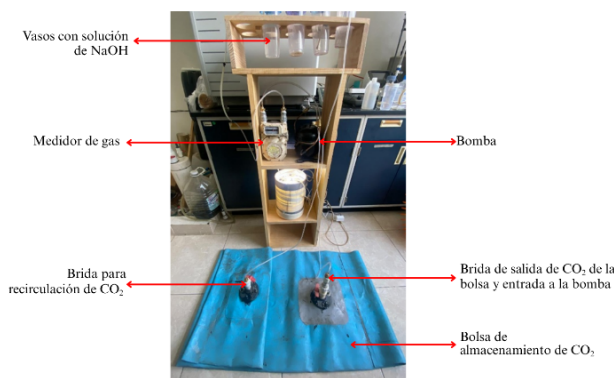


Fig. 1. Primer prototipo. Fuente: elaboración propia.



Fig. 2. Frascos con *Arthrospira platensis* en el día 1. Fuente: elaboración propia.

Si bien se suele mencionar que el rango de pH al cual crece *Arthrospira platensis* es de 9-11 y existen investigaciones en las cuales fue posible que *Arthrospira platensis* persistiera en un pH cercano a 11, la realidad es que a valores de 10.5 y 11 se reportan grandes disminuciones de crecimiento, baja producción de biomasa y pigmentos (Ismail et al., 2016). Lo reportado por Ismail y colaboradores confirma que el pH de la solución utilizada en esta primera prueba no fue la ideal. Sin embargo, existieron otros factores que posiblemente tuvieron influencia en la muerte de *Arthrospira platensis*, por ejemplo, la temperatura. Si bien se utilizó una intensidad lumínica dentro del rango óptimo, las tiras LED estaban muy cerca de los medios con *A. platensis*, lo cual calentó demasiado el medio de cultivo, por arriba de 30 °C (temperatura óptima para *A. platensis*) lo que redujo su crecimiento (Soni et al., 2019). Además, se cometió el error de seguir burbujando los vasos para mantener el medio agitado, sin embargo, esto hizo que siguiera entrando CO₂ al medio y el carbonato presente en el medio se convirtiera en bicarbonato, lo que alcalinizó aún más el medio de cultivo de *A. platensis*, por lo tanto, su muerte.

En la segunda prueba realizada en este primer prototipo utilizando una solución de NaOH 0.0010 M se suministraron 10 L de CO₂. El pH inicial de la solución de NaOH fue de 10.7. Al finalizar el suministro de CO₂ el pH fue de 5.5, por lo tanto, fue necesario ajustar el pH de la solución a un valor de aproximadamente 9 con NaOH para posteriormente complementar la solución y convertirla en medio Zarrouk e inocular *Arthrospira platensis*. El valor de DO 560 nm del medio Zarrouk inoculado se ajustó a un valor de 0.1 para comenzar, este fue el valor en el día 0. Las células de *Arthrospira platensis* se tornaron amarillas en el transcurso de los días 2 y 3, como se muestra en la figura 3, por esta razón no fue posible continuar con las mediciones de DO. Es importante mencionar que el pH de los frascos en los días 2 y 3 fue de 11.16 en promedio.

En esta segunda prueba, *A. platensis* resistió 1 día más en comparación con la primera prueba y el cambio de color de las células fue amarillo. Sin embargo, el error en esta prueba fue que la cantidad de NaOH en la solución no fue la suficiente para capturar los 10 L de CO₂. 1 mol de NaOH captura 1 mol de CO₂ de acuerdo con la reacción estequiométrica. Esta solución de NaOH tenía 0.001 mol de NaOH. Y 0.001 mol de CO₂ equivalen a 22.4 ml de CO₂, esto significa que solo 0.0224 L de los 10 L de CO₂ fueron capturados por el NaOH, el resto se disolvió en el agua lo que provocó una gran disminución del pH en la solución, lo que favoreció la formación de HCO₃⁻ de la interacción del NaOH con el CO₂. Al adicionar más NaOH para elevar el pH de la solución se formaron iones carbonato (CO₃²⁻) debido a la interacción del HCO₃⁻ con los iones hidróxido (OH⁻).

Lo anterior fue determinado cuantitativamente realizando la técnica de determinación de carbonatos y bicarbonatos descrita en la metodología del presente trabajo. Los resultados de esta determinación se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados de la determinación de HCO₃⁻ y CO₃²⁻ de la solución utilizada en la segunda prueba del primer prototipo.

Solución	HCO ₃ ⁻ [g/L]	CO ₃ ²⁻ [g/L]
Inicial (pH 5.5)	0.5260	0
Ajustada (pH 9.14)	0.5738	0.3292
Final. Células de <i>A. platensis</i> amarillas (pH 11.16)	0.1036	2.2422

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla, la cantidad de carbonatos y bicarbonatos es muy baja en comparación con la cantidad de HCO₃⁻ que utiliza el medio Zarrouk estándar la cual es de 16.8 g/L. Además, debido a que los frascos no estaban completamente herméticos, posiblemente hubo una fuga de CO₂ del medio de cultivo al ambiente que favoreció la conversión de los bicarbonatos en carbonatos (presentado en la tabla 1) y provocó el aumento de pH de la solución (a 11.16), como ya se mencionó con anterioridad, a este pH disminuye significativamente el crecimiento de *A. platensis*, aunado a ello, se usó el mismo fotobiorreactor que en la prueba pasada, es decir, se sometió a las misma intensidad lumínica lo cual provocó una gran elevación de temperatura del medio. Ambas variables pudieron provocar el estrés de *A. platensis* y afectar en su producción de pigmentos.

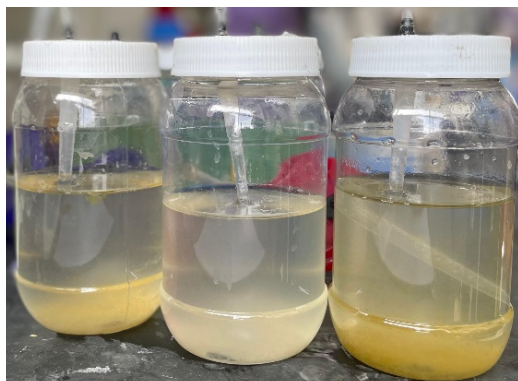


Fig. 3. Frascos con *Arthrospira platensis* en el día 4. Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Resumen de las pruebas realizadas en el primer prototipo.

No. de prueba	Condiciones iniciales de la solución de NaOH	Volumen de CO ₂ suministrado	Condiciones finales de la solución (después de suministrar CO ₂)	Efecto en <i>A. platensis</i>
1	Concentración = 1.8 M pH = 14 T ≈ 40 °C Burbujeo constante	40 L	pH = 10.79	Las células se tornaron transparentes
2	Concentración = 0.0010 M pH = 10.7 T ≈ 40 °C	10 L	pH = 5.5 (ajustado a pH 9)	Las células se tornaron amarillas

Fuente: elaboración propia.

Segundo prototipo de captura de CO₂

En la figura 4 se muestra el segundo prototipo construido. En la figura 5, se muestran los resultados de la composición de la mezcla de aire con CO₂ en la cámara de recuperación a lo largo del suministro de la mezcla. Se observó que, con el paso del tiempo, cada vez se captura menos CO₂ en la solución y por lo tanto el CO₂ no capturado llega a la cámara aumentando la cantidad en esta.

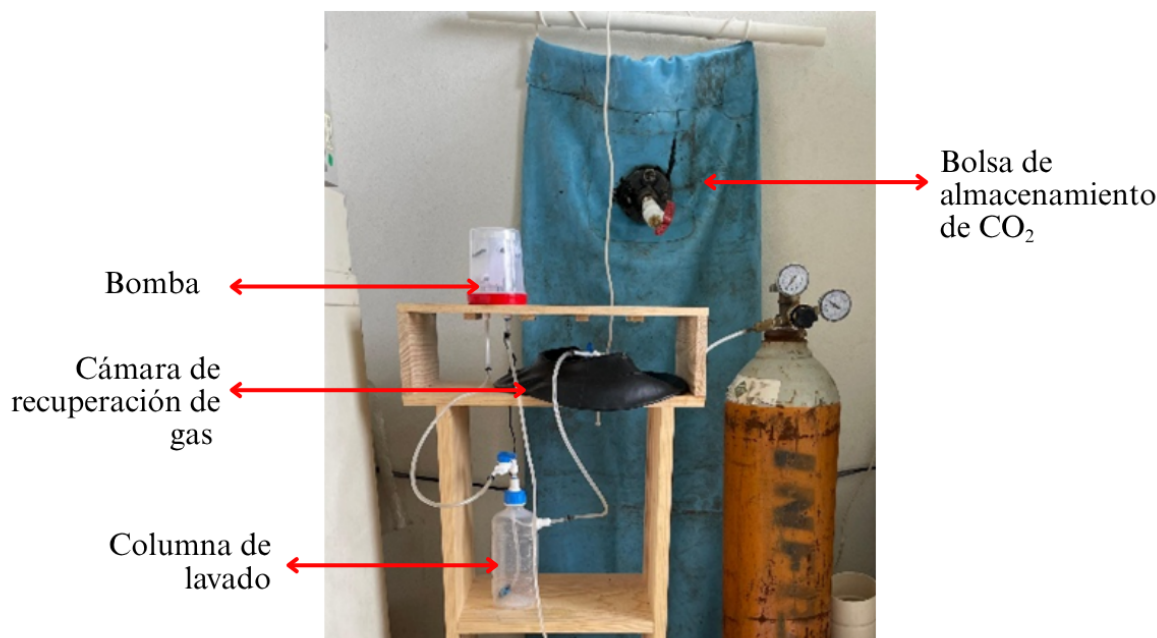
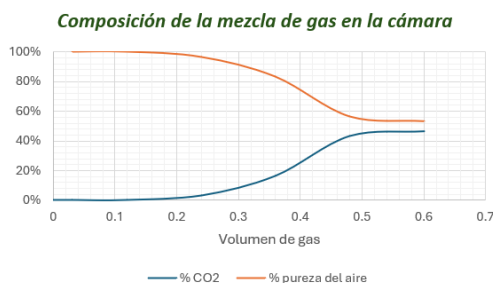
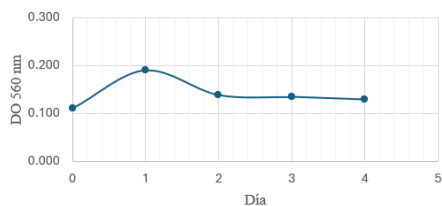


Fig. 4. Segundo prototipo. Fuente: elaboración propia.

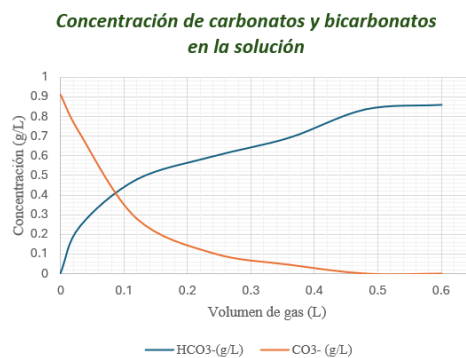


(a)

Cinética de crecimiento en medio Zarrouk modificado (en 2do prototipo)

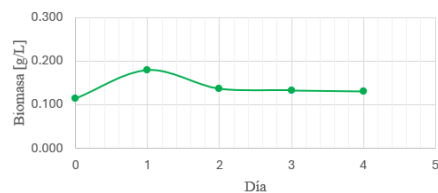


(c)



(b)

Cinética de crecimiento en medio Zarrouk modificado (en 2do prototipo)



(d)

Figura 5. Resultados prototipo 2. (a) Gráfico de la composición de la mezcla de gas en la cámara de recuperación. (b) Gráfico de la concentración de carbonatos y bicarbonatos en la solución de NaOH a la que se le suministró CO₂. (c) Cinética de DO 560 nm en medio Zarrouk modificado. (d) Cinética de crecimiento en medio Zarrouk modificado.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Resumen de la prueba realizada en el segundo prototipo.

No. de prueba	Condiciones iniciales de la solución de NaOH	Volumen de mezcla de aire y CO ₂ suministrado	Condiciones finales de la solución (después de suministrar CO ₂)	Efecto en <i>A. platensis</i>
1	Concentración = 0.01 M pH = 11.27 T ≈ 40 °C	20 L aire + 20 L CO ₂	pH = 6 (ajustado a pH 9)	Las células se mantuvieron verdes, pero no hubo crecimiento exponencial

Fuente: elaboración propia.

Tercer prototipo de cultivo de *Arthrospira platensis*

El fotobiorreactor donde se colocaron los 3 vasos con medio de cultivo con *A. platensis* se muestra en la figura 6. El resultado de la primera cinética de crecimiento de *A. platensis* en medio Zarrouk estándar se muestra en la figura 7. La cinética finalizó en el día 10 debido a la disminución drástica de biomasa, además de que se perdió aproximadamente 2/3 del volumen inicial debido a la evaporación del medio por la alta temperatura a la que fue expuesto. Se midió la temperatura del medio en los frascos en el día 10 y fue de 40 °C, un valor fuera del rango óptimo para *A. platensis* y, por lo tanto, el motivo de su muerte.

Investigaciones mencionan que la temperatura óptima para muchas cepas de *A. platensis* es 30 °C, sin embargo, existen cepas termotolerantes, los resultados de su experimento muestran que, a una temperatura de 30 °C el crecimiento de la biomasa fue significativamente mayor que en cultivos a 40 °C y 20 °C, y el cultivo a 40 °C provocó un estancamiento de la producción de biomasa después de solo 4 días. Los autores mencionan que el calor desintegra moléculas funcionales (p. ej., enzimas) y puede reducir la actividad carboxilasa de Rubisco, lo que resulta en una pérdida de productividad de biomasa y compuestos de alto valor (Nghinaunye et al., 2023).

Sin embargo, se puede observar la rápida producción de biomasa de *A. platensis* en estas condiciones de iluminación. El trabajo de Tapia reporta una producción de biomasa de aproximadamente 0.6 g/L en el quinto día de la cinética de crecimiento usando tiras de luces LED que proporcionaban 3000 lux manteniendo la temperatura en aproximadamente 30 °C, mientras que en el presente experimento se alcanzó una concentración de biomasa de 2.12 g/L en el quinto día de la cinética de crecimiento (Tapia, 2024).

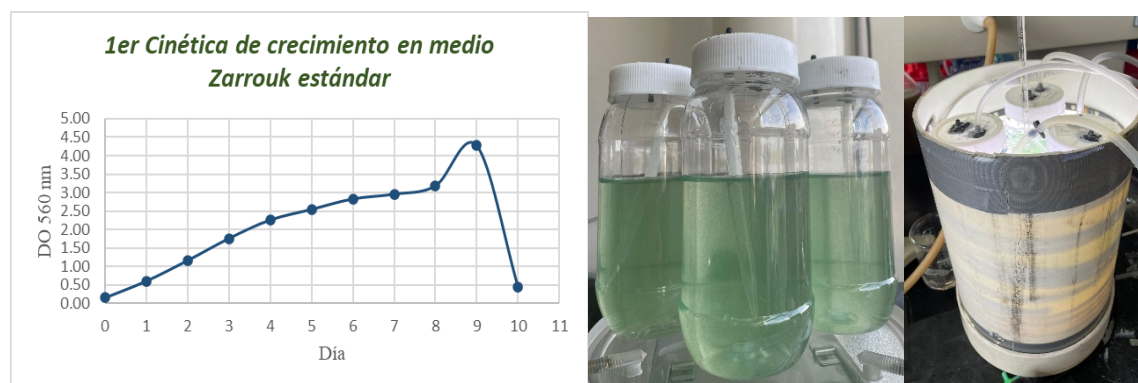


Fig. 6. Gráfica de la primera cinética de DO 560 nm en medio Zarrouk estándar. Fuente: elaboración propia.

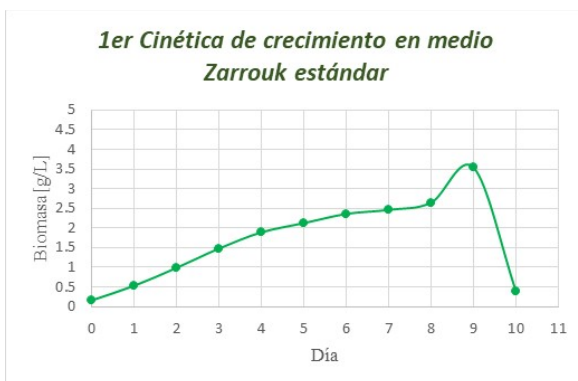


Fig. 7. Gráfica de la primera cinética de DO 560 nm en medio Zarrouk estándar. Fuente: elaboración propia.

Se realizó una segunda cinética de crecimiento en medio Zarrouk estándar de la misma forma que la descrita anteriormente, pero esta vez se disminuyó la cantidad de luz, buscando disminuir la temperatura del medio de cultivo y evitar la evaporación del medio de cultivo para esto, se cubrió aproximadamente un 40% del interior del fotobiorreactor con un trozo de cartón cubierto con papel aluminio para permitir el reflejo de la luz como se muestra en la figura 8. El resultado de la segunda cinética de crecimiento de *A. platensis* en medio Zarrouk estándar se muestra en la figura 9. De igual forma, se midió la temperatura del medio en los frascos en el décimo día y fue de 36 °C. En comparación con la primera cinética de crecimiento, esta vez se logró mantener la producción de biomasa hasta el décimo día y una producción de biomasa similar a la de la primera cinética.

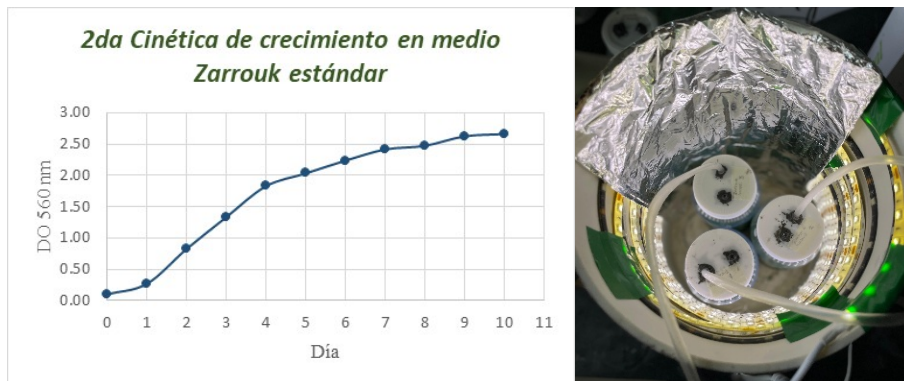


Fig. 8. Gráfica de la segunda cinética de DO 560 nm en medio Zarrouk estándar. Fuente: elaboración propia.

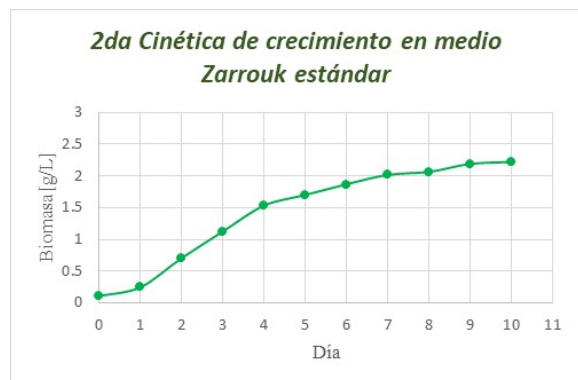


Fig. 9. Gráfica de la segunda cinética de crecimiento en medio Zarrouk estándar. Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Resumen de las pruebas realizadas en el tercer prototipo.

No. de prueba	Condiciones del medio Zarrouk en el biorreactor	Efecto en <i>A. platensis</i>
1	pH $\approx$ 9 T $\approx$ 40 °C Iluminación $\approx$ 10,100 luxes Burbujeo constante	La cinética finalizó en el día 10 debido a la disminución drástica de biomasa.
2	pH $\approx$ 9 T $\approx$ 36 °C Iluminación $\approx$ 10,100 luxes Burbujeo constante	Se logró mantener la producción de biomasa hasta el décimo día y una producción de biomasa similar a la de la primera cinética.

Fuente: elaboración propia.

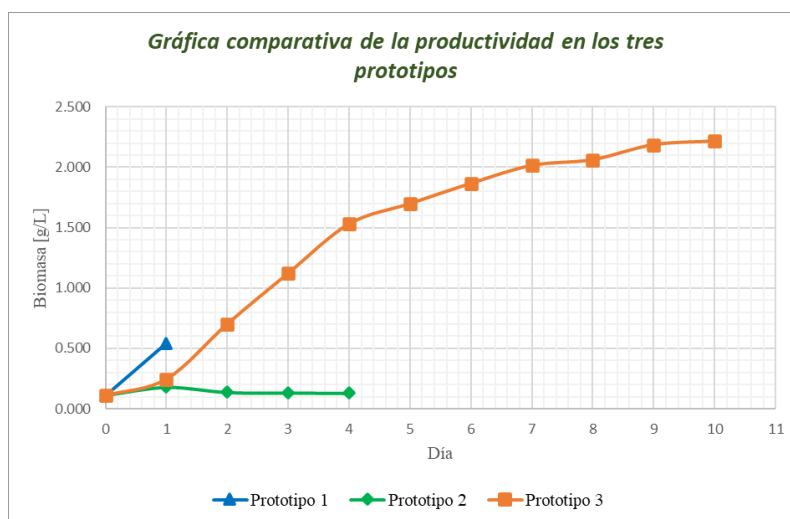


Fig. 10. Gráfica comparativa de la productividad en los 3 prototipos (Para el primer y tercer prototipo se graficó la segunda prueba realizada en estos). Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

El presente proyecto permitió evaluar la viabilidad del crecimiento de *Arthrospira platensis* en medios de cultivo modificados a partir de la captura de CO₂ utilizando soluciones de NaOH en dos prototipos y un tercer prototipo para su cultivo en medio Zarrouk estándar en un fotobiorreactor. A través del diseño y operación de estos sistemas, se logró transformar el CO₂ en especies inorgánicas disueltas como carbonatos y bicarbonatos, estos últimos fundamentales para la nutrición de *A. platensis* en medios alcalinos. Sin embargo, los resultados evidenciaron que el éxito del cultivo no depende únicamente de la disponibilidad de carbono, sino también de un control riguroso de parámetros como pH, temperatura y condiciones de iluminación.

La complejidad de este sistema de captura de CO₂ pensado como medio para cultivar *A. platensis* recae en que el CO₂ cambia drásticamente el pH de la solución lo cual tiene influencia en el tipo de especies formadas en la solución, determinado pH puede favorecer la formación de bicarbonatos o carbonatos, y de no haber suficiente NaOH para capturar el CO₂ ó suficiente CO₂ para transformar todo el NaOH de la solución pueden no obtenerse las especies buscadas necesarias para el crecimiento de *A. platensis*.

En la primera prueba, el pH y temperatura elevados y el exceso de CO₂ que provocó una acumulación de bicarbonato y por lo tanto una alcalinidad excesiva, afectaron negativamente el crecimiento de la

cianobacteria. En la segunda prueba, si bien se mejoró el control de pH, la baja concentración de bicarbonato disponible y el sobrecalentamiento del medio debido a la cercanía de las fuentes de luz también comprometieron la producción de biomasa.

El cultivo en el tercer prototipo dio los mejores resultados respecto a la producción de biomasa, donde el control de temperatura fue crucial para mantener la producción de *A. platensis* durante el tiempo, el cultivo persistió vivo a temperatura de 36 °C en comparación al medio a 40 °C.

Es importante mencionar que el compresor de refrigerador utilizado en el primer prototipo como bomba se dañó debido a que no es el equipo apropiado para esta actividad. A pesar de las limitaciones encontradas, esta investigación demuestra el potencial de acoplar procesos de captura de CO₂ con sistemas de cultivo de microalgas, siempre que se realicen un buen diseño y construcción del sistema y se cuiden las condiciones de operación como el pH, la temperatura, iluminación y disponibilidad de nutrientes. Futuras investigaciones deberán enfocarse en cuidar estas condiciones para asegurar un ambiente estable y favorable para la producción sostenible de biomasa, además, se sugiere realizar cálculos previamente considerando las reacciones químicas involucradas en el sistema considerando los cambios de pH y como influyen estos en las reacciones. Finalmente se recomienda cuidar el tipo de componentes utilizados para el sistema, cuidando que sean capaces de llevar a cabo la función que se pretende desempeñen.

Debido a las adversidades experimentales que se presentaron en este proyecto que llevaron a la ineficiente producción de *A. platensis* no se determinó la Tasa Interna de Retorno o, en otras palabras, la rentabilidad de este proceso pues estos resultados experimentales obtenidos son únicamente preliminares y sería incorrecto utilizarlos como base para definir la rentabilidad de un proceso producción de proteína de *A. platensis* a partir de la captura de dióxido de carbono ya que es necesario realizar más investigación al respecto considerando las variables mencionadas anteriormente en este trabajo, pues estas son críticas porque afectan directamente al éxito del proceso y, en consecuencia, a su rentabilidad.

REFERENCIAS

- Chaiklahan, R., Chirasuwan, N., Srinorasing, T., Attasat, S., Nopharatana, A., & Bunnag, B. (2021). Enhanced biomass and phycocyanin production of *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis* by a cultivation management strategy: Light intensity and cell concentration. *Bioresource Technology*, 343, 126077–126077. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126077>
- Ismail, M. M. S., El-Ayouty, Y. M., & Piercey-Normore, M. (2016). Role of pH on antioxidants production by *Spirulina* (*Arthrospira platensis*). *Brazilian Journal of Microbiology*, 47(2), 298–304. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.01.003>
- Nghinaunye T, Waldeck P, Jung CGH, Küpper J-H, Jung F, Braune S. Response of *Arthrospira platensis* to different temperatures regarding growth and biochemical composition. *Clinical Hemorheology and Microcirculation*. 2023;86(1-2):205-211. <https://doi.org/10.3233/CH-238104>
- Sabir, A. W., Han, D. Y., Kim, S. W., Jung, S. M., Kim, G.-H., Forchhammer, K., Kwon, J.-H., & Lee, P. S. (2025). Integrated membrane contactor system using NaOH solution for biogas purification and polyhydroxyalkanoate synthesis via cyanobacteria. *Chemical Engineering Journal* (Lausanne, Switzerland: 1996), 518(164705), 164705. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.164705>
- Soni, R. A., Sudhakar, K., & Rana, R. S. (2019). Comparative study on the growth performance of *Spirulina platensis* on modifying culture media. *Energy Reports*, 5, 327–336. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.02.009>
- Tapia, K. A (2024). Estudio proteómico de *Arthrospira platensis* bajo diferentes condiciones de CO₂.