

EFFECTO DE LA DOSIFICACIÓN DE CO₂ EN LA CINÉTICA DE CRECIMIENTO DE MICROALGAS *Chlorella vulgaris* Y *Scenedesmus obliquus*

EFFECT OF CO₂ DOSING ON GROWTH KINETICS OF *Chlorella vulgaris* AND *Scenedesmus obliquus* MICROALGAE

¹Milton Cesar Ararat Orozco, ²Oscar Eduardo Sanclemente Reyes, ³Leonardo Vergara

¹PhD. en Ciencias Agrarias – Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

²PhD. en Agroecología – Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

³Ingeniero Ambiental – Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

¹milton.ararat@unad.edu.co, ²oscar.sanclemente@unad.edu.co,

³leonardo.vergara@cvc.gov.co

RESUMEN

Contextualización: actualmente se ha incrementado el interés en la producción de microalgas debido a los diferentes usos de la biomasa microalgal en algunos sectores industriales, además de la posibilidad de emplearse en la mitigación de gases de efecto invernadero gracias a su alta capacidad para la captura de CO₂.

Vacío de conocimiento: como parte del Acuerdo de París en 2015, Colombia se comprometió en reducir un 20% sus emisiones de gases efecto invernadero, con el propósito de contribuir a la meta establecida para 2050; por esta razón, se deben desarrollar investigaciones y planes de acción enfocados a este objetivo.

Propósito del estudio: el propósito de este estudio es evaluar del efecto de la inducción de CO₂ en diferentes concentraciones sobre la cinética de crecimiento de *Chlorella Vulgaris* CV_2714A y *Scenedesmus Obliquus* SOB_001 en un sistema de fotobiorreactores a escala laboratorio, en un volumen de 3,8 L de medio de cultivo (solución NPK + micronutrientes).

Metodología: los ensayos se realizaron en fotoperiodos con 12 h de luz y 12 h de oscuridad durante 5 días consecutivos. El diseño experimental aleatorizado cuyas fuentes de variación fueron: especie microalgas y dosificación de CO₂ (0, 2, 6,5, y 12,8 L. día⁻¹) con iluminación artificial por lámpara fluorescente de 4400 lúmenes. Se estimó la concentración

celular por medio de la aproximación numérica en cámara de "Neubauer" con la metodología usada por Darki et al. (2017), además de tasa de crecimiento y tiempo de duplicación celular en días de acuerdo con Andersen, (2005). Los datos fueron sometidos al análisis de varianza y pruebas de medias de Tukey ($p < 0,05$).

Resultados y conclusiones: los resultados en los diferentes ensayos mostraron mayor concentración celular en *C. vulgaris* en comparación con *S. obliquus*. En cuanto al suministro de CO_2 , las 2 especies obtuvieron respuesta significativamente mayor ($p < 0,05$) a la dosis de 6.5 L. día^{-1} alcanzando concentración celular de $2.59 \times 10^7 \text{ cel.ml}^{-1}$ y $4.62 \times 10^6 \text{ cel.ml}^{-1}$ respectivamente. Estos resultados permiten concluir que el cultivo de estas microalgas asociado a la dosis de CO_2 puede favorecer a su rápido crecimiento y producción de biomasa, al tiempo que, también puede contribuir a otros estudios sobre disminución de gases de efecto invernadero.

Palabras clave: cambio climático, fotobioreactores, crecimiento celular, biomasa

ABSTRACT

Contextualization: Currently, interest in the production of microalgae has increased due to the different uses of microalgal biomass in some industrial sectors, in addition to being used in the mitigation of greenhouse gases thanks to its high capacity for CO_2 capture.

Knowledge gap: Being part of the Paris Agreement in 2015, Colombia is committed to reduce its greenhouse gases emissions by 20%, to contribute to the goal set for 2050, for this reason, it must adopt research and action plans focused on this objective.

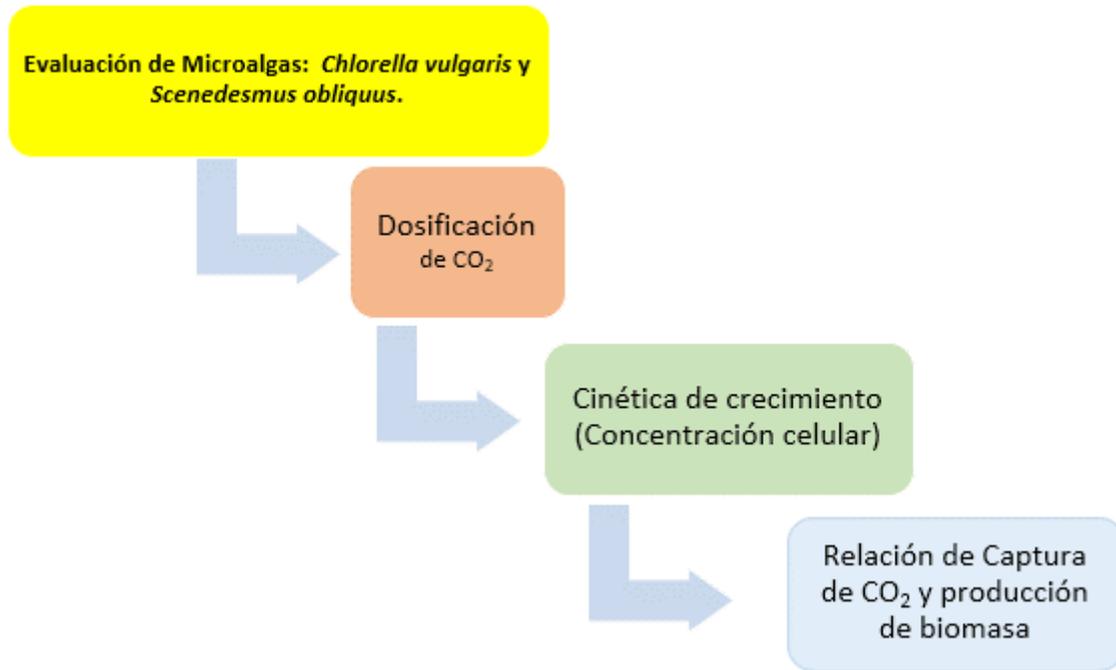
Purpose: the purpose of this study was to evaluate the effect of CO_2 induction at different concentrations on the growth kinetics of *Chlorella Vulgaris* CV_2714A and *Scenedesmus Obliquus* SOB_001 in a laboratory scale photobioreactor system in a volume of 3.8 L of culture medium (NPK solution + micronutrients).

Methodology: The tests were carried out in photoperiods with 12 hours of light and 12 hours of darkness for 5 consecutive days. The completely randomized experimental design whose sources of variation were microalgae species and CO_2 dosage (0.2 , 6.5 and 12.8 L. day^{-1}) with artificial lighting by a 4400-lumen fluorescent lamp. The cellular concentration was estimated by means of the numerical approximation in the "Neubauer" chamber with the methodology used by Darki et al. (2017), in addition to growth rate and cell doubling time in days according to Andersen, (2005). The data were submitted to analysis of variance and Tukey's mean tests ($p < 0.05$).

Results and conclusions: The results in the different tests showed a higher cell concentration in *C. vulgaris* compared to *S. obliquus*. Regarding CO_2 supply, the 2 species obtained a significantly greater response ($p < 0.05$) at the dose of 6.5 L. day^{-1} , reaching a cellular concentration of $2.59 \times 10^7 \text{ cel.ml}^{-1}$ and $4.62 \times 10^6 \text{ cel.ml}^{-1}$, respectively. These results allow us to conclude that the cultivation of these microalgae associated with the dose of CO_2 can favor their rapid growth and biomass production, while also contributing to other studies on the reduction of greenhouse gases.

Keywords: Climate change, photobioreactors, cell growth, biomass

RESUMEN GRÁFICO



1. INTRODUCCIÓN

El aumento incesante de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) ha llevado al calentamiento global y como consecuencia el actual cambio climático (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014). Las actividades antrópicas como la incineración de combustibles fósiles y también la deforestación han derivado en una emisión intensiva de estos gases (Sanclemente, 2012), siendo el dióxido de carbono (CO_2), el principal gas que ha aumentado su concentración en la atmósfera llegando a superar los 400 ppm (Blunden, Arndt, & Hart eld , 2018) y contribuyendo con el 70% del total de las emisiones de GEI (Patiño, 2018). El cambio climático ha causado sequías extremas e inundaciones que afectan profundamente la salud de las personas, desencadenando brotes y enfermedades infecciosas, además de los graves daños a la infraestructura colapsando los servicios de salud (Organización Mundial de la Salud & Organización Meteorológica Mundial., 2012) y

agotando los recursos medicinales (Mosquera *et al.* 2019).

El cambio climático que se vive actualmente es una realidad innegable que desde el año 1950 y ha registrado cambios sin precedentes (IPCC, 2014), convirtiéndose en uno de los principales desafíos para la agricultura principalmente en condiciones ambientales del trópico debido a los efectos generados como las heladas, las sequías o las inundaciones (Ararat, 2014). Esto genera la necesidad de tomar medidas inmediatas que permitan solucionar de manera e caz y económica los problemas de productividad que ponen en riesgo la seguridad alimentaria (Sierra, 2015) y posibles afectaciones a servicios ecosistémicos de abastecimiento (Monsalve *et al.* (2019).

En la mayoría de las fuentes hídricas de la tierra coexiste una gran diversidad de microorganismos que poseen la capacidad de usar fotones

como fuente energética para el desarrollo de su proceso de metabolismo. Un ejemplo de estos son las cianobacterias y las microalgas que transforman el CO₂ atmosférico en azúcares, lípidos y oxígeno mediante el proceso de la fotosíntesis, siendo las responsables de la producción de más del 50% del oxígeno global (Enzing et al., 2014). Estos microorganismos interactúan dentro de su hábitat con componentes orgánicos e inorgánicos ayudando a mantener el equilibrio y desarrollando un papel vital con relación a los demás organismos acuáticos (Pulido et al 2019).

Las microalgas tienen un crecimiento suficientemente rápido y pueden producir mayores cantidades de biomasa comparadas con las plantas superiores terrestres; además, su capacidad de adaptación al medio de cultivo y la disponibilidad de nutrientes es una de sus ventajas evolutivas de mayor relevancia (Venkata et al, 2015). Estos microorganismos poseen la capacidad de desarrollarse en medios con altos niveles de CO₂, haciendo que sean perfectos para ser cultivadas con los gases residuales de la combustión emitidos por las industrias e incluso, usar las aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales como medio de cultivo gracias a su habilidad de adaptación o ajuste al medio, permitiéndoles incorporar nutrientes como nitrógeno (N) y fósforo (P) en sus procesos metabólicos (Lee, 2015).

En el proceso o ajuste fotosintético actúan 2 grupos de reacciones, el primero está asociado a reacciones dependientes de la luz solar, en estas fuerzas se da la absorción y transmisión de la energía de los fotones, encapsulamiento de la energía y la formación del compuesto Nicotinamida-Adenina-Dinucleótido-Fosfato (NADPH) y Adenosín Trifosfato (ATP); Durante

estos procesos se facilita la oxidación fotoquímica de la molécula de agua liberando átomos de oxígeno como un subproducto (Barsanti, 2006). El segundo grupo de reacciones son las independientes de la luz. En este proceso las moléculas NADPH y ATP se utilizan para la fijación o adherencia del CO₂ en la formación de carbohidratos. Estas reacciones no ocurren en ausencia de la luz aun cuando sean independientes de la misma, ambas reacciones se dan de forma simultánea y se conocen como Ciclo de Calvin (Barsanti, 2006).

El cultivo de microalgas a gran escala se ha desarrollado durante décadas con fines farmacéuticos y para consumo humano; sin embargo, la idea de cultivarlas como fuente energética aparece solo hasta 1950 y solo se consideró importante 20 años después debido al incremento del precio del petróleo, donde se evaluó ampliamente el potencial de las microalgas para la producción de biodiesel (Farroq, 2015). En esta dirección, la combinación de la fijación biológica del CO₂ mediante microalgas junto con el método de aguas residuales con el objetivo de obtener biodiesel se convierte en una estrategia atractiva para la mitigación biológica del CO₂, siendo más viable económicamente y sostenible ambientalmente (Razzak, 2017). El biocombustible producido a partir de la biomasa de microalgas podría ser una buena alternativa a los combustibles derivados del petróleo, gracias a que pueden ser utilizados sin problemas en los sistemas de combustión actuales, además del incremento en la tendencia a la utilización de biocombustibles a nivel mundial (Ramírez, 2017).

Algunos estudios revelan que la cinética de crecimiento de varias especies de microalgas está estrechamente relacionada con las

concentraciones de CO₂ adicional utilizadas durante su cultivo. Esto indica que estas especies se pueden utilizar en la fijación biológica del CO₂ con fines ambientales; por ejemplo, la prevención y conservación de ecosistemas en estudios de caso citados por Montenegro *et al* (2019), y a su vez en la búsqueda de la producción de biomasa para la producción de bio-combustibles y otros productos de alto valor (Kassim, 2017). El objetivo principal de este estudio fue evaluar el efecto de la dosificación de CO₂ en la cinética de crecimiento de las microalgas *C. vulgaris* y *S. obliquus*, en condiciones controladas de un sistema de compuesto por 3 fotobiorreactores a escala laboratorio, con un fotoperiodo aproximado de 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad y tres dosificaciones de CO₂.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en la ciudad de Santiago de Cali (Valle del Cauca), Colombia, en un sitio ubicado en las coordenadas 3°25'0.58'' N 76°31'9.49'' W. El montaje del experimento está situado a una altura de 956 m.s.n.m. cuya temperatura promedio anual es de 24°C.

Se utilizaron las cepas de las microalgas *Chlorella Vulgaris* CV-2714A y *Scenedesmus Obliquus* SOB-001 provistas por la empresa NUTRE S.A.S de Bogotá D.C., Colombia. Los medios de cultivo fueron elaborados con las siguientes concentraciones: 0.8 g.L⁻¹ de N total, 0.5 g.L⁻¹ de K₂O y 0.5 g.L⁻¹ de P₂O₅, según lo indicado en la metodología propuesta por Ammar *et al.* (2016), considerando las

concentraciones porcentuales de cada nutriente y a través de una regla matemática se calculó la cantidad en gramos por utilizar de cada fertilizante para estimar la concentración final (CF) de cada nutriente en los medios de cultivo. Para la preparación de los medios de cultivo se usaron los fertilizantes comerciales de uso agrícola, *TODO EN UNO* 42-0-0 (SUPERABONO S.A.S. Bogotá, Colombia), *FOSFACEL* 20-53-0 (COSMOAGRO S.A. Palmira, Colombia), *Nitrato de potasio* 13-0-44 (MICROFERTISA S.A. Bogotá, Colombia) y *NITRAX-S*, 28-4-0-6 (YARA. Cartagena, Colombia).

Se elaboró una cámara de cultivo experimental con las siguientes características: 130 cm de largo, 30cm de fondo y 50 cm de alto, extracción controlada de aire, luminaria artificial y dos temporizadores para administrar el manejo del fotoperiodo y la dosificación de aire y CO₂ a un 87.65% de pureza. Como fotobiorreactores se emplearon botellas plásticas con capacidad de 4L, el ensayo se realizó diseño experimental completamente al azar de 6 tratamientos con 3 réplicas (Tabla 1) en 5 tiempos de muestreo. Los fotobiorreactores se enlazaron a un sistema de inyección alternado de aire con un flujo preciso de 0.7 L.min⁻¹ y con un flujo de CO₂ de 0.15 L.min⁻¹ basado en la metodología diseñada por Razzak *et al.* (2017). Se suspendió temporalmente la dosificación de CO₂ durante la fase oscura del fotoperiodo.

Se emplearon 3 intervalos de dosificación de CO₂ para cada una de las cepas, para un total de 6 ensayos (Tabla 1).

Tabla 1. Dosis de CO₂ suministrada a las microalgas *C. vulgaris* y *S. obliquus* en cada uno de los ensayos.

Ensayo (E): dosificación de CO ₂	Cepa de microalga	Vol. CO ₂ L. día ⁻¹
E1	<i>C. vulgaris</i> .	12.8
E2	<i>C. vulgaris</i> .	6.5
E3	<i>C. vulgaris</i> .	0.2
E4	<i>S. obliquus</i> .	12.8
E5	<i>S. obliquus</i> .	6.5
E6	<i>S. obliquus</i> .	0.2

Fuente: Autores

El fotoperíodo se ejecutó por medio de iluminación artificial con asistencia de una lámpara fluorescente (SYLVANIA) de luz blanca (54W_4400 lúmenes). La duración de cada ensayo fue de 5 días en cada una de las dosificaciones utilizadas. La temperatura promedio de la cámara de cultivo se conservó entre 26 y 31°C.

Análisis de concentración celular y cinética de crecimiento

$$\text{No. Cel./mL} = \text{total de células contadas} * 10^4 * \text{factor de dilución} \quad (1)$$

La velocidad específica del crecimiento de estas cepas se calculó a través de la ecuación 2 (Andersen, 2005):

$$\mu_{\max}(d^{-1}) = \frac{\ln CV_{tf} - \ln CV_{ti}}{(tf - ti)} \quad (2)$$

Donde:

Ln CV es logaritmo natural de concentración celular por volumen de medio de cultivo.

tf y ti son los tiempos (final e inicial respectivamente) del ensayo.

La cuantificación de la concentración de células y la evaluación de la cinética del crecimiento estimado se realizó mediante la metodología de recuento celular en microscopio óptico (Amscope B120c, Irvine, California) y cámara de Neubauer (Marienfeld, Lauda-Königshofen, Alemania), el cálculo de la concentración se realizó mediante la ecuación 1, realizando conteos diarios del número de células como lo propone la metodología usada por Darki *et al.* (2017).

El tiempo de duplicación determinado en días, es el tiempo requerido para la duplicación de células, el cual se calculó a partir de la tasa de crecimiento por medio de la ecuación 3 (Andersen, 2005):

$$d_{ti} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (3)$$

Análisis estadístico

Los datos obtenidos para cada cepa de microalga se sometieron a un análisis de varianza de dos factores (ensayos vs tiempo de crecimiento) y pruebas de medias de Tukey ($p < 0.05$)

para determinar las diferencias significativas entre los ensayos y posteriormente la estimación de la concentración celular en función de la variable "dosis de CO₂" para las 2 especies de microalgas (*C. vulgaris* y *S. obliquus*). Preliminarmente, se comprobó la normalidad de los datos a través de la prueba de Shapiro Wilks para cada momento de muestreo (W: estadístico > valor crítico: VC). Para el procedimiento (PROC) GLM, prueba del rango estudentizado, se utilizó el programa estadístico SAS versión

9.3. Las gráficas de las curvas de crecimiento se realizaron mediante software Excel 2016.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La interacción de la temporalidad en las dos especies de microalgas se ilustra en la figura 1, observándose diferencias significativas en las estimaciones poblacionales según los días de observación y los ensayos (E) correspondientes a la dosis de CO₂.



Figura 1. Promedios de estimaciones poblacionales para las células de *C. vulgaris* y *S. obliquus* en los días de observación (A) y los Ensayos de dosis (B) (Análisis a través de agrupamiento de Tukey Alfa = 0.05. Los promedios cubiertos por la misma barra no son significativamente diferentes).

Fuente: Autores

La Figura 2 ilustra la curva de crecimiento de la cepa *C. vulgaris*, la cual manifestó que la fase exponencial en E1 y E3 inicio a partir del día 1, mientras que en E2 inició desde el día 0 siendo este ensayo donde se alcanzó la densidad celular más alta con cel.ml⁻¹. En el ensayo E3 la densidad celular alcanzada fue de cel.ml⁻¹, una densidad mayor que la lograda en E1. Finalmente, el ensayo en el que se presentó la menor densidad de células fue en E1 con un máximo de cel.ml⁻¹, inferior al obtenido en E3 aun cuando contó con la dosis de CO₂ más alta de los tres ensayos. Los resultados obtenidos en los ensayos E1

a E3 se asemejan a los resultados obtenidos por Zheng *et al.* (2012), en los que los crecimientos más altos se obtuvieron con las dosis de CO₂ intermedias 1, 5 y 10%. De igual modo, la concentración de CO₂ más alta inhibió el crecimiento microalgal y la concentración más baja de CO₂ produjo un crecimiento limitado. Por su parte, Ortiz *et al* (2014) indica que el uso de aire enriquecido con CO₂ a concentraciones del 2, 4, 8 y 16% como fuente de carbono produce concentraciones altas de biomasa, permitiendo usar con éxito la microalga *C. vulgaris* en la mitigación de CO₂ de las emisiones industriales.

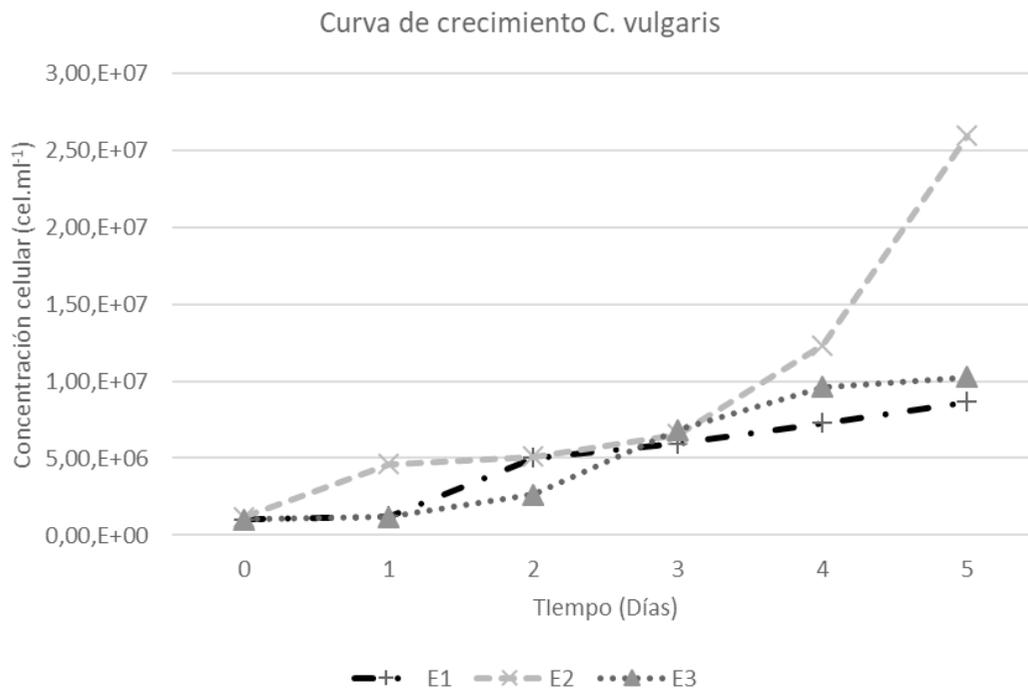


Figura 2. Ilustración de la curva de crecimiento de *C. vulgaris*. Ensayos E1 a E3, luminaria artificial de 54 Watts (4400 lm) con fotoperiodo luz: oscuridad (12:12), rango de temperatura 26 – 31°C.

Fuente: Autores

En la tabla 1 se presenta la cinética de crecimiento por *C. vulgaris*, ratificando que E2 tuvo mayor velocidad específica de crecimiento (μ), en comparación con E1 y E3, y un menor tiempo de duplicación celular 1.12d. La estimación de estos valores tiende a generar una estrecha relación con la capacidad productiva del

sistema. Para el análisis de varianza elaborado a los ensayos E1 a E3, la variable densidad de células en *C. vulgaris* proyectó diferencias altamente significativas entre los 3 ensayos. Estos contrastes estadísticos entre los ensayos E1 y E3 se determinaron con el test de Tukey a un nivel de confianza del 95% ($p < 0.05$).

Tabla 2. Estimación de la Cinética de crecimiento de *C. vulgaris*. Ensayos E1 a E3, luminosidad artificial de 54Watts (4400 lm) con fotoperiodo luz: oscuridad (12:12), rango de temperatura 26°C – 31°C.

Ensayo (E)	Cepa	$\mu_{max}(d^{-1})$	d_{ti}
E1	<i>C. vulgaris</i> .	0,43 c	1,60
E2	<i>C. vulgaris</i> .	0,62 a	1,12
E3	<i>C. vulgaris</i> .	0,47 b	1,49

Las letras en $\mu_{max}(d^{-1})$ indican la diferencia estadística de Tukey ($p < 0.05$)

Fuente: Autores

El comportamiento de *S. obliquus* al someterse a diferentes dosis de CO₂ establecidas en esta metodología se ilustra en la figura 3. La curva de crecimiento muestra que el cambio exponencial para los ensayos E4 a E6 inicia a partir del primer día, en cuanto al crecimiento el ensayo E5, se identifica la mayor la densidad de células logrando valoraciones de 4,62 x 10⁶ cel.ml⁻¹. Para el ensayo E4 el máximo valor obtenido fue

de 3,46 x 10⁶ cel.ml⁻¹, mientras E6 mostró la menor densidad de células cuyo máximo valor no superó 3,03 x 10⁶ cel.ml⁻¹. Estos resultados guardan una similitud respecto a los resultados obtenidos por Abd El Baky *et al.* (2012) en los que se cultivó la microalga *S. obliquus* con una mezcla de aire y CO₂ a concentraciones del 0.3, 3, 9 y 12%, donde la concentración de biomasa más alta se obtuvo al 9% de CO₂.

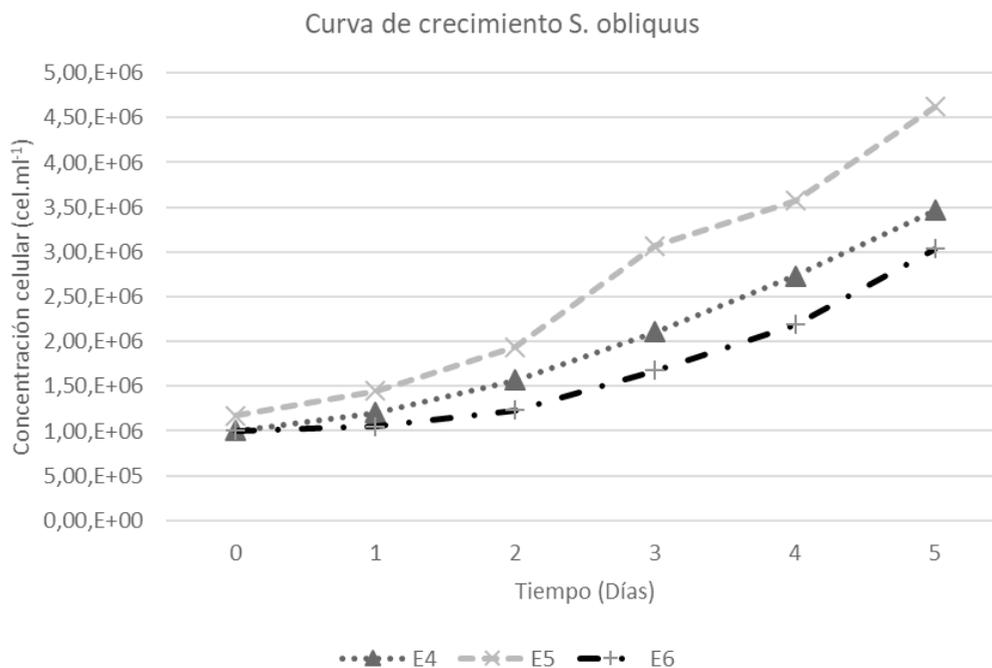


Figura 3. Ilustración de la curva de crecimiento de *S. obliquus*. Ensayos E4 a E6, luminosidad artificial de 54 Watts (4400 lm) con fotoperiodo luz: oscuridad (12:12), rango de temperatura 26°C – 31°C.

Fuente: Autores

La Tabla 3 presenta valores estimados a la cinética de crecimiento mostrada por *S. obliquus*, ratificando que E5 presentó mayor velocidad específica de crecimiento, en comparación con E4 y E6, y su tiempo de duplicación celular fue menor 1.12d. Estas valoraciones indican una relación muy estrecha con la capacidad productiva en el sistema. En el respectivo

análisis de varianza, los ensayos E4 a E6 en la variable "densidad de células" de *S. obliquus* proyectaron diferencias altamente significativas entre los 3 ensayos. La respectiva estadística entre los ensayos E4 a E6 se determinaron mediante la prueba de Tukey a un nivel de confianza del 95% ($p < 0.05$).

Tabla 3. Estimación de la Cinética de crecimiento de *S. obliquus*. Ensayos E4 a E6, iluminación artificial de 54Watts (4400 lm) con fotoperiodo luz: oscuridad (12:12), rango de temperatura 26°C – 31°C.

Ensayo (E)	Cepa	$\mu_{max}(d^{-1})$	d_{ti}
E4	<i>S. obliquus</i> .	0,25 b	2,79
E5	<i>S. obliquus</i> .	0,27 a	2,52
E6	<i>S. obliquus</i> .	0,22 c	3,12

Las letras en $\mu_{max}(d^{-1})$ indican la diferencia estadística de Tukey ($p < 0.05$)

Fuente: Autores

El contraste entre *C. vulgaris* y *S. obliquus* de los tres ensayos aplicados (dosis de CO_2 y aire controlado) a cada especie (grupos 4), permite reconocer diferencias estadísticas significativas, donde se observó que *C. vulgaris* siempre alcanzó una mayor densidad de células. El análisis de varianza realizado a los ensayos E1 y E4 se presentó diferencia altamente significativa en ambas especies evaluadas a las mismas condiciones de dosis de CO_2 y aire controlado, siendo la cepa *C. vulgaris* con un registro máximo de $8,67 \times 10^6$ cel.ml⁻¹ mientras *S. obliquus* alcanzó un máximo valor de $3,46 \times 10^6$ cel.ml⁻¹, encontrándose una

diferencia de 2.5 veces más de densidad celular en *C. vulgaris*. Para el caso de los ensayos E2 y E5, *C. vulgaris* logró una densidad máxima de $2,59 \times 10^7$ cel.ml⁻¹ y la cepa *S. obliquus* alcanzó un valor máximo de $4,62 \times 10^6$ cel.ml⁻¹, permitiendo observar una densidad celular 5.6 veces mayor en *C. vulgaris*. Posteriormente, en los ensayos E3 y E6 donde se usó aire atmosférico, la cepa *C. vulgaris* obtuvo un valor máximo de $1,03 \times 10^7$ cel.ml⁻¹ y la cepa *S. obliquus* alcanzó una densidad máxima de $3,03 \times 10^6$ cel.ml⁻¹, generando una diferencia de 3,4 veces más densidad celular en *C. vulgaris*.

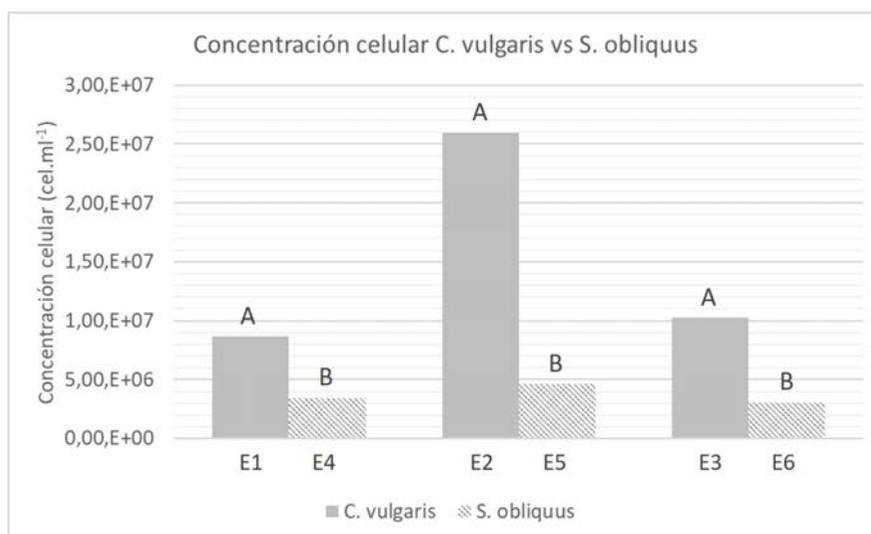


Figura 4. Ilustración de ANOVA – Densidad de células de *C. vulgaris* y *S. obliquus*. Ensayos E1 a E6. Prueba de rangos múltiples para (E1, E4), (E2, E5) y (E3, E6). Tukey ($p < 0.05$). Luminosidad artificial de 54 Watts (4400 lm) con fotoperiodo 12:12, rango de temperatura 26°C – 31°C. Las letras en las barras indican las diferencias entre las especies para cada dosis de CO_2 suministrada según prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Fuente: Autores

4. CONCLUSIONES

La dosificación de CO₂ adicional benefició la cinética del crecimiento de las 2 especies, especialmente en *C. vulgaris*, donde la cantidad de CO₂ dosificado en E2 y E5 mostró los valores de densidad celular más altos para ambas especies de microalgas, siendo la condición más favorable de todos los ensayos realizados para mejorar su productividad.

Los resultados obtenidos en los ensayos E1 a E3 verificados con la cepa *C. vulgaris* mostraron que no hay una relación directa entre la cantidad de CO₂ dosificado y la densidad de células. Esta situación era esperada ya que, con el uso de solo aire atmosférico, la densidad celular de *C. vulgaris* en E3, alcanza valores mayores a los obtenidos con una alta dosificación de CO₂ como la del ensayo E1.

Los resultados obtenidos en este estudio mostraron que las microalgas *C. vulgaris* y *S. obliquus* tienen alto potencial para ser utilizadas en cultivos con condiciones controladas que busquen objetivos como la captura de CO₂ y producción de biomasa.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Primer autor: investigación, análisis de datos, conceptualización, escritura – revisión y edición, adquisición de recursos, administrador del proyecto. Segundo autor: investigación, conceptualización, análisis de datos, supervisión, escritura – revisión y edición. Tercer autor: investigación, conceptualización, metodología, logística, escritura – borrador original.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa NUTRE S.A.S. la cual contribuyo aportando las cepas de las microalgas y medios de cultivo utilizados durante el desarrollo del proyecto. A el MSc Pablo Gallo, quien contribuyo al desarrollo del análisis de muestras por la técnica de conteo con cámara de

Neubauer y por sus consejos en el área de la microbiología que aportaron al buen desarrollo de este proyecto.

LITERATURA CITADA

- Abd El Baky, H., El-Baroty, G., Bouaid, A., Martínez, M., y Aracil, J. (2012). Enhancement of lipid accumulation in *Scenedesmus obliquus* by Optimizing CO₂ and Fe³⁺ levels for biodiesel production. *Bioresource Technology*, 429-432. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.104>
- Ammar, S. (2016). Cultivation of Microalgae *Chlorella vulgaris* in Airlift photobioreactor for Biomass Production using commercial NPK Nutrients. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 12(1), 90-99. Retrieved from <https://www.iasj.net/iasj?func=article&aId=107937>
- Andersen, R. (2005). *Algal Culturing Techniques*. Academic Press.
- Barsanti, L. G. (2006). *Algae: Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology* (1st Edition ed.). CRC Press.
- Ararat M., Sinisterra C., y Hernández C. (2014). Valoraciones agronómicas y de rendimiento en la cosecha de "papa china" (*Colocasia esculenta* L.) en el trópico húmedo colombiano. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, Vol. 5 (2), 169-180. <https://doi.org/10.22490/21456453.1335>
- Blunden, J., Arndt, D., y Hart eld, G. (Agosto de 2018). State of the Climate in 2017. 99(8). <https://doi.org/10.1175/2018BAMSStateoftheClimate.1>
- Darki, B. S. (2017). Effect of nutrients on total lipid content and fatty acids profile of *Scenedesmus obliquus*. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 60, 1-12. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4324-2017160304>
- Enzing, C., Ploeg, M., Barbosa, M., y Sijtsma, L. (2014). Microalgae-based products for the food and feed sector: an outlook for Europe. (M. Viganí, C. Parisi, & E. Rodríguez, Edits.) <http://dx.doi.org/10.2791/3339>
- Farroq, W. S. (2015). Water use and its recycling in microalgae cultivation for biofuel application. *Bioresource Technology*, 73 - 81. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.140>
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Retrieved from

https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf

- Kassim, M. M., Meng T. (2017). Carbon dioxide (CO₂) bio fixation by microalgae and its potential for biorefinery and biofuel production. *Science of the Total Environment*, 1121 - 1129. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.172>
- Lee, E. J. (2015). Growth kinetic models for microalgae cultivation: A review. *Algal Research*, 497 - 512. Recuperate de <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.10.004>
- Monsalve Castro, L. M., Valencia Trujillo, F. L., Guzmán Lenis, A. R., Duque Chaves, C. M., Pérez Giraldo, D. A., Valderrama L., C. F., Moraes Boldini, J., y Polanco Puerta, M. F. (2019). Capítulo 2: Servicio ecosistémico de abastecimiento: alimentos. *Libros Universidad Nacional Abierta Y a Distancia*, 34 - 56. <https://doi.org/10.22490/9789586516358.02>
- Montenegro Gómez, S. P., Barrera Berdugo, S. E., Chiriví Salomón, J. S., Pulido Pulido, S. Y., Sepúlveda Casadiego, Y. A., Vinasco Guzmán, M. C., y Palomino Leiva, M. L. (2019). Capítulo 9. Prevención de la erosión y conservación de la fertilidad del suelo. *Libros Universidad Nacional Abierta Y a Distancia*, 172 - 187. <https://doi.org/10.22490/9789586516358.09>
- Mosquera, R. A., Carmona, M. E., Pulido, S. Y., Vinasco, M. C., Moraes, J., Barrera, S. E., & Montenegro, S. P. (2019). Capítulo 4. Recursos Medicinales. *Libros Universidad Nacional Abierta Y a Distancia*. doi: <https://doi.org/10.22490/9789586516358.04>
- Organización Mundial de la Salud y Organización Meteorológica Mundial OMS. (2012). Atlas de la Salud y del Clima. Obtenido de Biblioteca de la OMM - Exposición de publicaciones: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/112303>
- Ortiz, E., Casazza, A., Aliakbarian, B., Perego, P., Coverti, A., y Monteiro, J. (2014). Production of *Chlorella vulgaris* as a source of essential fatty acids in a tubular photobioreactor continuously fed with air enriched with CO₂ at different concentrations. *Biotechnology Progress*, 916-922. doi: <https://doi.org/10.1002/btpr.1885>
- Patiño, S. S. (2018). Captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Armero-Guayabal, Tolima, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 121 - 134. doi: <https://doi.org/10.22490/21456453.2312>
- Pulido, S. Y., Mosquera Mena, R. A., Rodríguez Espinosa, S. A., Fonseca Lara, M. R., Montenegro Gómez, S. P., Valencia Trujillo, F. L., y Barrera Berdugo, S. E. (2019). Capítulo 12. Hábitat para especies. *Libros Universidad Nacional Abierta Y a Distancia*, 212 - 224. <https://doi.org/10.22490/9789586516358.12>
- Ramírez, J. (2017). Viabilidad en la producción de biomasa microalgal a partir de fotobioreactores solares en el Valle del Cauca, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 127 - 140. <https://doi.org/10.22490/21456453.2039>
- Razzak, S. A. (2017). Biological CO₂ fixation with production of microalgae in wastewater – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 379 - 390. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.038>
- Sanclemente, Ó. P. (2012). Análisis del balance energético de diferentes sistemas de manejo agroecológico del suelo, en el cultivo del maíz. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 3(1), 41-46. <https://doi.org/10.22490/21456453.929>
- Sierra, S. C. (2015). Estrategias de adaptación al cambio climático en dos localidades del municipio de Junín, Cundinamarca, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 227- 237. <https://doi.org/10.22490/21456453.1282>
- Venkata, S. R. Rohit MV., Chiranjeevi P., Chandra R. Navaneetha B. (2015). Heterotrophic microalgae cultivation to synergize biodiesel production with waste remediation: Progress and perspectives. *Bioresource Technology*, 186, 169 - 178. Recuperate de <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.056>
- Zheng, H., Gao, Z., Yin, F., Ji, X., & Huang, H. (2012). Effect of CO₂ supply conditions on lipid production of *Chlorella vulgaris* from enzymatic hydrolysates of lipid-extracted microalgal biomass residues. *Bioresource Technology*, 126, 24-30. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.048>



Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional License.

Conflicto de Intereses
Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses