

# EVALUACIÓN DE PROCESOS NECESARIOS PARA CAPTACIÓN Y/O ALMACENAMIENTO DE CO<sub>2</sub> COMO UNA MEDIDA DE REDUCCIÓN AL IMPACTO AMBIENTAL

Lizbeth Alejandra Barajas Hernández\*; Emerson Albeiro Sierra Castellanos.

Escuela de Ingeniería de Petróleos. Universidad Industrial de Santander (UIS). Carrera 27 Calle 9. Bucaramanga, Colombia.

\*E-mail: lizbeth.barajas@correo.uis.edu.co

## RESUMEN

La captura de CO<sub>2</sub> se ha convertido en un reto, sin embargo existen diferentes métodos que conllevan a minimizar la cantidad de emisión de dióxido de carbono al medio ambiente y son amigables con el mismo. Haciendo alusión a los métodos existen diferentes tipos, desde físicos, químicos, hasta biológicos; dentro de estos encontramos los “cultivos de microalgas”. Las microalgas son microorganismos que crecen muy rápido y se caracterizan por tener facilidad para fijar dióxido de carbono con mayor rapidez que otros sistemas biológicos. Por lo tanto es necesaria la optimización de un ambiente que sea apto para el desarrollo de estos microorganismos.

El método se basa en evaluar el comportamiento de los microorganismos en la captura de CO<sub>2</sub>, variando las concentraciones de nutrientes como el fósforo y/o el nitrógeno bajo determinadas condiciones, para establecer cuál es la concentración óptima para una eficaz captura de CO<sub>2</sub>. Por medio del software estadística versión 7, que establece estimados estadísticos, gráficas, tablas, resaltando cuál de los nutrientes tendrá una mayor incidencia en el microorganismo. Así con la producción de biomasa y los resultados obtenidos diferenciar este método de captura con respecto a los demás existentes para este propósito, cuya principal característica se enfoca en un menor consumo de agua y de energía. Finalmente generar un análisis de costo – beneficio para determinar la viabilidad del proyecto e incentivar su aplicación en la industria como una medida de mitigación al impacto ambiental.

**Palabras claves:** Microalgas, Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Fosforo, Carbono, Nitrógeno.

## ASSESSMENT OF THE NECESSARY PROCESSES FOR THE CAPTURE AND STORAGE OF CO<sub>2</sub> IN THE INDUSTRY AS MEASURE OF REDUCTION OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT

## ABSTRACT

The capture of CO<sub>2</sub> has been a challenge through time; however, there are different methods which contribute to minimize the emission of carbon dioxide to the environment. There are different kinds of these methods: physical, chemical and biological. One of the biological methods is the “culture of micro-algae”. The micro-algae are microorganisms of rapid growth that can fix carbon dioxide easier than any others biological systems, but is necessary an optimal environment for the development of these microorganisms.

The method is based in evaluate the behavior of micro-algae in the capture of CO<sub>2</sub>, with different conditions and concentrations of nutrients as phosphorus and nitrogen for each experiment. This process allows establishing the optimal concentration for the capture of CO<sub>2</sub>. By means of statistical software version 7, which gives us an approximation of the concentrations of these nutrients, together with statistical estimates, charts, tables, highlighting which of the nutrients will have a higher incidence in the microorganism, and the production of biomass. With the analysis of the results, it is possible to make a difference of this method with other methods of geological capture, which are focused in energy and water consumption. Finally, with the analysis of cost-benefit, it will determine the viability of the project and stimulate the application in the industry as a measure of mitigation of the environmental impact

**Key words:** Micro-algae, Carbon Dioxide CO<sub>2</sub>, Phosphorus, Carbon, Nitrogen.

**Cita:** Barajas, L.A. y Sierra E.A. (2017). Evaluación de procesos necesarios para captación y/o almacenamiento de CO<sub>2</sub> como una medida de reducción al impacto ambiental. *Revista Fuentes: El reventón energético*, 15 (2), 79-88.



## INTRODUCCIÓN

Actualmente en nuestro entorno existe una gran emisión de gases de efecto invernadero, entre estos el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el cual es muy dañino para el entorno; por lo tanto se proponen alternativas de tipo biológico, donde el gas ácido ( $\text{CO}_2$ ) es capturado y posteriormente almacenado en forma de biomasa.

Entre las alternativas biológicas se encuentra la tecnología por medio de microorganismos fotosintéticos que está generando gran interés, no solo por su alta capacidad de captura y fijación de  $\text{CO}_2$ , sino también por su utilidad debido a que la producción de biomasa se puede emplear como base a muchos productos, por otra parte encontramos su fácil adaptación al medio en donde se aplique, también por su capacidad de crecimiento en aguas de baja calidad (aguas residuales) o agua de mar, manteniendo su equilibrio de crecimiento y desarrollo.

Este método tiene algunas desventajas, las cuales hacen referencia, a las dificultades en el control de las condiciones del cultivo como son: la reducción en la cantidad de luz al aumentar la profundidad e irregularidades en las condiciones ambientales (temperaturas, humedad, etc) en el medio donde se desee implementar el proyecto, no contar con una buena fuente de suministro de dióxido de carbono  $\text{CO}_2$  o la simple no adaptación de las especies a las condiciones suministradas; por tanto sino se tienen en cuenta las condiciones específicas para la realización de este proyecto se presenta un retraso en los resultados (captura y/o almacenamiento de  $\text{CO}_2$ ), junto con la producción de biomasa, comercialización de la misma y finalmente la recuperación a su inversión inicial.

Según lo establecido anteriormente, la mejor forma de realizar la evaluación por este método biológico, es mediante el software estadística versión 7. El software permite hacer una comparación de la cantidad necesaria de nutrientes que necesitan las microalgas para su rendimiento (captura y almacenamiento de  $\text{CO}_2$ ) y este sea el más apto para las condiciones y/o necesidades de la industria.

## CAPTURA DE $\text{CO}_2$ CON MICROALGAS

El secuestro biológico mediante microalgas ha llamado la atención durante los últimos años, pues poseen altas tasas de fijación de  $\text{CO}_2$ , y originan considerables cantidades de biomasa renovable para numerosas utilidades. Estos microorganismos pueden usar el 9 %

de la energía solar para producir aproximadamente 280 toneladas de biomasa seca por hectárea por año, mientras que consume o absorbe alrededor de 513 toneladas de  $\text{CO}_2$ . No obstante el mérito de la mitigación de  $\text{CO}_2$  prima en el hecho de que la biomasa generada durante el proceso de fijación de  $\text{CO}_2$  puede ser transformada en biocombustibles para la producción de energía lo que haría viable su implementación (Wang, Li, Wu y Lan, 2008).

La fotosíntesis es un proceso por el cual el agua se descompone en oxígeno y un agente reductor necesario para la reducción de  $\text{CO}_2$  a carbono orgánico. Sucede en dos fases, una de ellas comprende las reacciones de luz en donde ocurren las reacciones celulares, estas células convierten la energía lumínica en energía química que es aglomerada en compuestos bastante energéticos para luego ser utilizados en las reacciones de fijación de carbono (Iverson, 2006), y la otra etapa hace referencia a las reacciones de la fijación de carbono, las cuales se dan tanto en presencia como ausencia de luz.

El dióxido de carbono además de ser una fuente de carbono contribuye a la inspección del pH, durante la inyección de  $\text{CO}_2$  se pueden observar los siguientes fenómenos: uno de ellos es la inhibición al utilizar fracciones molares altas de  $\text{CO}_2$ . Estas concentraciones máximas (inhibidor) y mínimas (limitante) cambian de especie a especie, entonces la concentración de  $\text{CO}_2$  no solo debe ser baja dependiendo del valor mínimo de carbono que requiera el alga, sino que tampoco exceda un valor límite superior para así evitar una gran pérdida de  $\text{CO}_2$  que no puede ser usado por el alga y liberado por el cultivo llevando esto a una polución innecesaria (Cheng, Zhang, Chen y Gao, 2006).

Algunos autores han examinado la fijación de  $\text{CO}_2$  en la biomasa algal (Kajiwara, Yamada y Narumasa, 1997) (Chae, Hwang y Shin, 2006) (Lopes, Lacerda y Franco 2008) mientras otros han establecido tasas globales de secuestro de  $\text{CO}_2$  por medio de balance de masa de los componentes de la fase líquida o gaseosa de dicho cultivo, estos autores no colocaron un valor fijo de  $\text{CO}_2$  fue efectivamente fijado en la biomasa de la microalga (Fan et al., 2007) (Lopes et al., 2008). Si cambia la composición de la biomasa producida, cambia la tasa particular de consumo de un sustrato y el producto obtenido, si son autótrofos el sustrato y producto aludirá a  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$ ; La relación entre la tasa de producción de  $\text{O}_2$  y consumo de  $\text{CO}_2$  (coeficiente fotosintético) depende de la composición de la biomasa producida y de los sustratos usados (Eriksen, Riisgard, Gunther y Iverson, 2007).

Los microorganismos se pueden desarrollar en sus ambientes naturales o abiertos, como lagos, ríos, océanos, etc, y en sistemas abiertos, (fotobiorreactores) diseñados de diferentes manera, dependiendo del lugar en donde se desee implementar el método, de las condiciones luz, y fuente de suministro de CO<sub>2</sub>. El tema primordial a considerar con el consumo del CO<sub>2</sub> es que por un lado el dióxido de carbono dentro del reactor no debe lograr concentraciones altas, que darían lugar a una inhibición, por otro lado, no debe caer mucho, o limitará el crecimiento (Rados, Vaclav y Frantisek, 1975). Estas concentraciones máximas y mínimas cambian de especie en especie, y todavía no se conocen adecuadamente (Lee y Hing, 1989) (Rados, et al., 1975).

Petrobras reportó para el 2004 por un total de 44,4 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, 98,8% son emisiones de CO<sub>2</sub> (Petrobras, 2005) Buena parte de estas emisiones pueden ser minimizadas mediante la implementación de tecnologías biológicas, como el uso de microalgas tolerantes a altas concentraciones de CO<sub>2</sub> y SO<sub>x</sub>, debido a que a concentraciones en el aire de 50 ppm de SO<sub>x</sub> estas tienden a inhibirse (Watanabe, Ohmura y Saiki, 1992), (Kurano, et al., 1995).

## CULTIVO DE MICROALGAS

El cultivo de microalgas tiene mínimos requerimientos para su subsistencia tanto naturales como físicos; para los primeros se encuentra la composición del cultivo ya que de este depende la producción de biomasa, mientras que del físico se tienen los parámetros de intensidad lumínica, temperatura, pH y el fotoperiodo que pueden perjudicar el estado y comportamiento de la microalga (Qin, 2005).

La presencia de nutrientes en el medio al igual que la fuente de energía son puntos importantes a tener en cuenta para la reproducción, el mantenimiento celular y la biosíntesis de compuestos necesarios para el crecimiento, dichas necesidades están familiarizadas con la disponibilidad de macro y micronutrientes.

### MACRONUTRIENTES

Los macronutrientes son fundamentales para las microalgas, medidos en gramos por litro (g/l). Tienen como propósito la síntesis de compuestos celulares que hacen parte de la configuración algal. Para el cálculo de los requerimientos mínimos de estos nutrientes se puede realizar por medio de la fórmula aproximada de la biomasa CH<sub>1,83</sub>O<sub>0,48</sub>N<sub>0,11</sub>P<sub>0,01</sub> (Chisti, 2007).

**1. Fuente de carbono.** Este es el macronutriente más importante, se aporta al cultivo de forma inorgánica u

orgánica, el contenido de este carbono se encuentra en el dióxido de carbono usado para el crecimiento celular, el CO<sub>2</sub> es aplicado al medio junto con aire, este tiene funciones tales como nutrición microalgal, y controlar y mantener los niveles de pH.

**2. Fuente de nitrógeno.** Luego del carbono el nitrógeno es el macronutriente en orden de importancia que coopera con la formación de biomasa. La respuesta más común a la limitación de este nutriente es la decoloración celular y la acumulación de compuestos orgánicos como polisacáridos y ciertos aceites (Converti, Lodi, Del Borghi y Solisio, 2006). *Chlorella* sp tiene la capacidad de crecer bajo cualquier fuente de nitrógeno.

**3. Fuente de fósforo.** El fósforo es necesario para el crecimiento microalgal y la formación de ADN y el ARN, el fósforo es distribuido en exceso en forma de fosfatos, pues estos forman complejos con los iones metálicos, generando que no todo el fósforo esté en disposición para la producción de biomasa (Chisti, 2007).

### MICRONUTRIENTES

Los micronutrientes son requeridos por las microalgas en cantidades de miligramos por litro (mg/L). su principal función es el debido funcionamiento de las células.

## METODOLOGÍA

Para llevar a cabo este proceso de medición se utilizó *Chorella vulgaris* UTEX 1803 la cual fue aplicada a nueve experimentos (simulación de fotobiorreactores) bajo diferentes concentraciones de las fuentes de fósforo, potasio y nitrógeno, para con ello evaluar el comportamiento de esta especie, su crecimiento y producción de biomasa de la misma.

### DISEÑO EXPERIMENTAL

Para determinar el efecto que posee la concentración de las fuentes de Nitrógeno (KNO<sub>3</sub>), fósforo y potasio (K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) sobre la producción de biomasa y subsecuente captura de carbono se empleó un diseño de experimentos central no factorial 2<sup>3</sup> (2 factores y 3 niveles) empleando el software STATISTICA 7.0 (Statsoft, 2004), (Tabla 1 y 2). Para cada una de los experimentos se emplearon reactores de vidrio de 1L con 0,5L de medio de cultivo con las respectivas modificaciones en las concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio; cada uno de los reactores se acopló a un sistema de agitación mediante la adición de aire por burbujeo a 0,6L<sub>aire</sub>/L<sub>medio</sub>.

**Tabla 1.** Variables para el diseño de experimentos

Reactor	KNO <sub>3</sub> (mL stock/L Medio de cultivo)	K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> (mL stock/L Medio de cultivo)	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (mL stock/L Medio de cultivo)
1	10	10	10
2	10	30	30
3	30	10	10
4	30	30	30
5 (c)	20	20	20
6	5,8	20	20
7	34	20	20
8	20	5,8	5,8
9	20	34	34

Fuente: (Autores)

**Tabla 2.** Diseño de experimentos para el cultivo de *C. Vulgaris* UTEX 1803

KNO <sub>3</sub> (mL stock/L Medio de cultivo)	K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> / KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (mL stock/L Medio de cultivo)
10	10
20	20
30	30

Fuente: (Autores)

**MICROORGANISMO**

*Chlorella vulgaris* UTEX 1803 fue adquirida de la colección de cepas proveniente de la Universidad de Texas (Austin, Texas, USA). El alga se mantuvo en el medio de cultivo Bold Basal modificado, donde cada litro de cultivo está compuesto por:

**Tabla 3.** Concentración de Macro y Micronutrientes

COMPUESTO	CONCENTRACIÓN FINAL EN EL MEDIO (Moles)
<b>Macronutrientes</b>	
KNO <sub>3</sub>	2,94 X10 <sup>-3</sup>
MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	3,04 X10 <sup>-4</sup>
NaCl	4,28 X 10 <sup>-4</sup>
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	4,31 X 10 <sup>-4</sup>
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	1,29 X 10 <sup>-3</sup>
CaCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	1,70 X 10 <sup>-4</sup>
<b>Micronutrientes</b>	
ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	3,07 X 10 <sup>-5</sup>
MnCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O	7,28 X 10 <sup>-6</sup>
MoO <sub>3</sub>	4,93 X 10 <sup>-6</sup>
CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O	6,29 X 10 <sup>-6</sup>
Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	1,68 X 10 <sup>-6</sup>
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	1,85 X 10 <sup>-4</sup>
EDTA	1,71 X 10 <sup>-4</sup>
KOH	5,53 X 10 <sup>-4</sup>
FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	1,79 X 10 <sup>-5</sup>

Los cultivos se llevaron a cabo en reactores rectangulares de 30 cm de altura y 10 cm de ancho con un volumen del cultivo de 0,35L. Los reactores se acoplaron a un sistema de aireación por burbujeo para la inyección de aire con flujo de 0,6 L/min como se observa en la Figura 1.

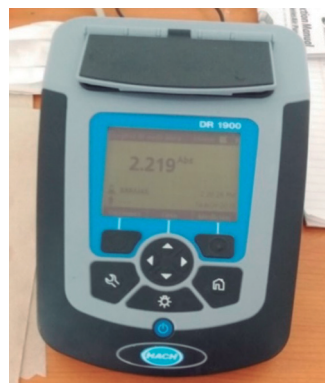


**Figura 1.** Reactores con mezcla entre microorganismos, agua destilada, corriente de aire.

Fuente: (Autores).

**DENSIDAD ÓPTICA**

Para la medición de concentración de biomasa se tomó una muestra de 1 mL de cultivo cada 3 días la cual se diluyo a una relación muestra/agua destilada de 1:9 para medir la densidad óptica de cada muestra a 440 nm usando un espectrómetro.



**Figura 2.** Espectrofotómetro (DR 1900, HACH).

Fuente: (Autores).

La densidad óptica (DO) se relacionó con la cantidad de biomasa de acuerdo con la ecuación 1:

$$CB=(DO_{550}-0,1734)/1,3161 \quad (1)$$

**PESO SECO**

El peso seco es la variable de cuantificación de biomasa producida en el sistema la cual es necesaria para realizar el cálculo de ceniza y concentración de carbono capturado el cual es determinado después de transcurridos 15

días para esto se toman 20 mL de medio de cultivo los cuales se filtran utilizando los filtros Whatman GF/C pre-combustionados durante 1 hora a 100°C, terminado este proceso se llevan los filtros a un horno durante 1 hora a 100°C, posteriormente son introducidos en un desecador por 12 horas, alcanzando un peso constante.

### DETERMINACIÓN DE CENIZAS

Para calcular la determinación de cenizas se desarrollan dos fases: la primera es la prueba de vacío, en la cual se agregan 3 mL de muestra de microorganismo en el papel filtro y esto se introduce en una bomba de vacío para realizar un vacío y secado húmedo (Figura 3); el papel filtro es llevado dentro de una fibra de vidrio con silica gel para combatir la humedad restante.



**Figura 3.** Procedimiento de pruebas de vacío.  
**Fuente:** (Autores).

La segunda fase comienza con el peso de cada uno de los filtros y su respectiva biomasa; después de realizar este paso las muestras son llevadas a una mufla durante 5 horas a 450°C. Finalizado el proceso los filtros fueron dejados en cámara desecadora durante 8 horas hasta alcanzar el peso constante, posteriormente se pesan todas las muestras para realizar el cálculo de biomasa libre de cenizas empleando la ecuación 2:

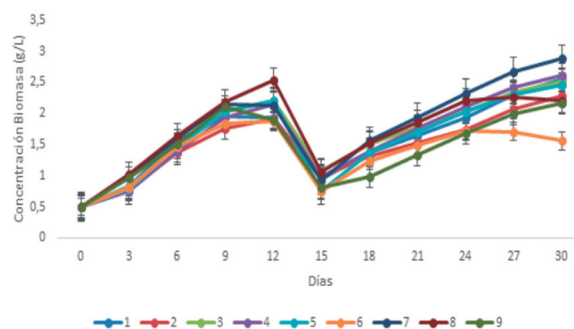
$$AFDW = DW - DWAM \quad (2)$$



**Figura 4.** Filtros con muestras en la mufla.  
**Fuente:** (Autores).

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

*Producción de Biomasa:* La Figura 5 en donde cada color representa los reactores con su respectiva muestra de microorganismos, se presentan los datos de concentración de biomasa durante los dos ciclos de cultivo se observa que para el primer ciclo el experimento N°2 es quien presenta mayor producción de biomasa, teniendo un valor de 2,54g/L. Para el segundo ciclo se realizó el mismo procedimiento y se observó una mayor producción de biomasa en el experimento N°7, estos resultados dependen principalmente de como el microorganismo para cada experimento asimile las fuentes de nitrógeno, potasio y fósforo suministrados.



**Figura 5.** Producción de biomasa *C. vulgaris* vs tiempo, bajo diferentes concentraciones de micro y macronutrientes.  
**Fuente:** (Autores)

### CAPACIDAD DE CAPTURA DE CO<sub>2</sub>

De acuerdo con los resultados, el experimento con mayor producción de biomasa después de 30 días fue el experimento 7 con 3,58 g/L, por otra parte la Figura 6 muestra que cerca del 10% de la biomasa está compuesta por cenizas, mientras que el 90% de esta es materia orgánica. Este resultado del 10% es obtenido de la diferencia de los filtros antes y después de haber sido introducidos en la mufla y dividido entre la cantidad de muestra proporcionada en el filtro (3mL) al momento de realizar la prueba de vacío, al resultado se le realiza un promedio, para luego ser dividido entre el último dato de biomasa obtenido.

Diferentes estudios han encontrado que la biomasa está compuesta en cerca de un 50% (p/p) por carbono, quitando las cenizas se obtiene el carbono total para este caso 1,61 g (tabla 4); sin embargo es necesario considerar con este carbono final se calcula una cantidad de CO<sub>2</sub> representado el 100% que es 5,98 g, no obstante este CO<sub>2</sub> no es el real inyectado ya que el proceso de fijación por medio de la fotosíntesis no

es 100% eficiente debido a barreras fisiológicas de las células y fisicoquímicas del medio (con valores cercanos al 70% de eficiencia). Con el dato anterior es posible determinar que la cantidad de CO<sub>2</sub> que se inyectó al medio para producir 3.59 g/L fueron 8.54 g, con una tasa de fijación de 0.2 gCO<sub>2</sub>/L\*d<sup>-1</sup>, por lo cual para capturar 1 ton/día de carbono se requieren 5000 m<sup>3</sup> de medio de cultivo.

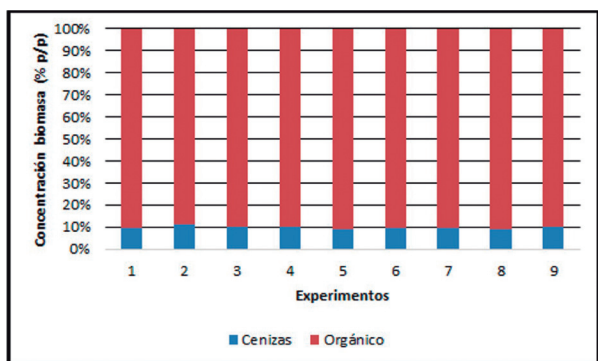


Figura 6. Resultados de cenizas.

Fuente: (Autores).

Tabla 4. Cantidad de CO<sub>2</sub> secuestrado.

Componente	Valor
Biomasa obtenida (g/L)	3,59
Cantidad carbono en Biomasa (g/L)	1,61
CO <sub>2</sub> Inyectado	8,54
CO <sub>2</sub> Fijado	5,98
Tasa de fijación (gCO <sub>2</sub> /L*d <sup>-1</sup> )	0,20

Fuente: (Autores).

### DATOS ESTADÍSTICOS

*Pareto de la producción de biomasa:* El diagrama Pareto (Figura 7) muestra que los valores de K<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> tomados, no fueron significativos en la producción de biomasa, mientras que el valor para la concentración de KNO<sub>3</sub> es más cercano para obtener una mayor producción de biomasa final, estos resultados se pueden deber a que los valores empleados son suficientes para producir una cantidad significativa de biomasa, por lo tanto si se desea obtener una mayor cantidad de biomasa en el cultivo, es necesario suministrar concentraciones mayores de KNO<sub>3</sub>, de igual manera, se puede observar la poca incidencia que tiene la presencia de fósforo para la producción de biomasa, estableciendo entonces la tolerancia del microorganismo a la composición regularmente pequeña de K<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, y KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>.

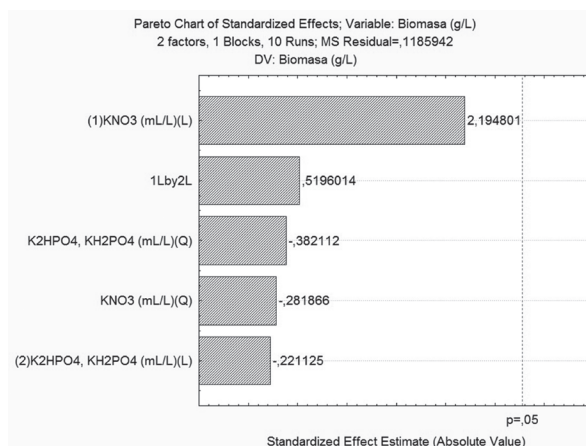


Figura 7. Diagrama de Pareto estandarizado para la producción de biomasa.

Fuente: (Autores).

*Producción de biomasa:* La relación de producción de biomasa con respecto a las presencias de Nitrógeno y fósforo en el cultivo están representadas en las figuras 8 y 9, el color vino tinto describe que con 35 ml de KNO<sub>3</sub>/L (de medio de cultivo) y 20 ml de K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, y KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (color amarillo) respectivamente, si es posible obtener la mayor cantidad de biomasa, es decir para lograr una alta producción de biomasa es recomendable aumentar la cantidad de la fuente de nitrógeno.

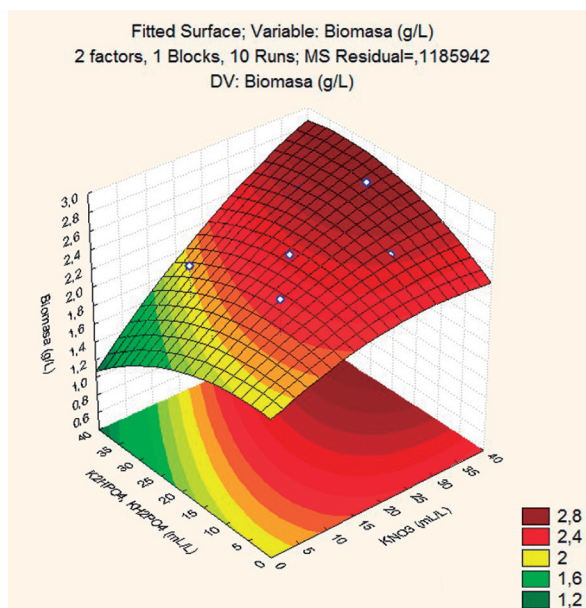
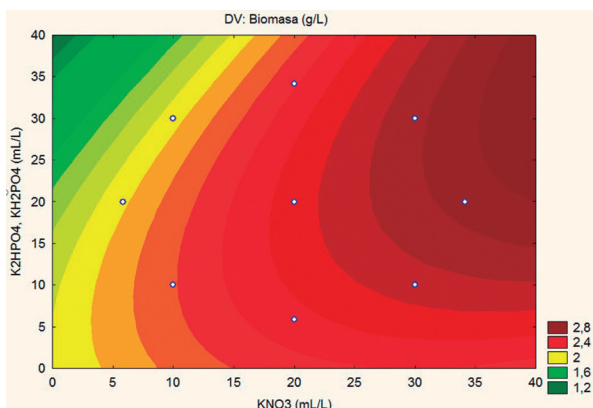


Figura 8. Resultados de la producción de biomasa, con relación a las concentraciones de KNO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>.

Fuente: (Autores).



**Figura 9.** Resultados de la producción de biomasa, con relación a las concentraciones KNO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>.

Fuente: Autores.

### ESTIMACIÓN PRELIMINAR DE LA CAPTURA DE CO<sub>2</sub> BAJO CONDICIONES REFINERÍA BARRANCABERMEJA

Basados en los diferentes resultados obtenidos en este estudio se evaluará la producción de *C. vulgaris* implementando la calculadora EnAlgae Open Pond. Para desarrollar esta aproximación académica se tendrán en cuenta variables climáticas de Barrancabermeja al igual que los valores promedio de irradiación solar anual, evaporación anual, temperatura promedio anual (mínimos y máximos), presencia de fuentes hídricas (natural y aguas residuales), tierra, fertilizantes, energía (Kwh) y producción (en peso seco).

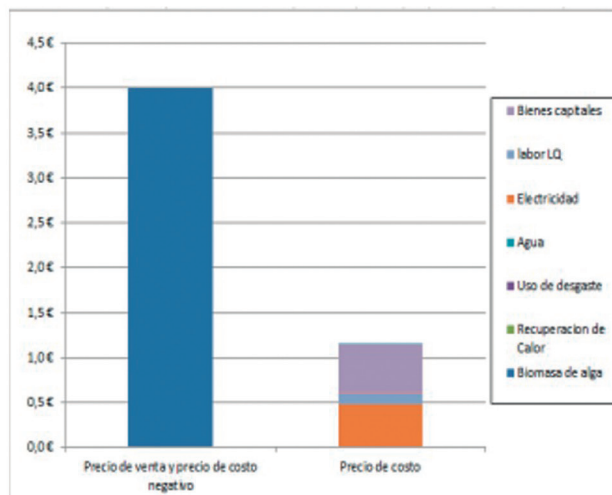
Haciendo un aproximado de precio de venta de biomasa de 4 €/Kg el precio de esta sería de 4'088.739 para un cultivo de 5000 m<sup>3</sup> de acuerdo con la información en la tabla 5, la tasa de retorno para este sistema está en 1,5 años.

**Tabla 5.** Variables Open Pond.

Retorno	Cantidad	Precio de venta	Retorno total
Biomasa de alga	1022185 kg ds	4 €/kg	€ 4.088.739
Costos variables	Cantidad	Precio por unidad	Costos variables totales
Uso del agua	41618 m <sup>3</sup>	0,000478 €/m <sup>3</sup>	€ 20
Electricidad	15379682 kWh	0,032 €/kWh	€ 492,150
CO <sub>2</sub>	2023926 kg	0 €/kg	€ 0
Recuperación de calor	259 kWh	0 €/kWh	€ 0
Labor LQ	10809 hr	11,53 €/hr	€ 124.627
Labor HQ	490 hr	25,57 €/hr	€ 12.522
Digerido	0 m <sup>3</sup>	-20 €/m <sup>3</sup>	€ 0
Fertilizante (N)	90848 kg N	1,08 kg N	€ 98.116
Fertilizante (P)	2888 Kg P	2,22 kg P	€ 6.425
Aguas residuales	35825 m <sup>3</sup>	0,1 €/m <sup>3</sup>	€ 3,583
<b>Total</b>			<b>€ 737,443</b>

Fuente: (Autores).

Economicos			
Retorno total			€ 4.088.739
Costos totales			€ 1.291.464
Resultados totales			€ 2.797.275
Retorno/100€ costos			317
Precio de venta			€ 4,00
Precio de costo			€ 1,26
total investments capital goods			€ 4.704.146
Retorno de la inversión			78%
Tiempo de reembolso (años)			1,4
	Precio de venta y precio de costo negativo	Precio de costo	% Precio de costo
Biomasa de alga	€ 4		0,0%
CO2 credits	€ 0,00		0,0%
Recuperación de calor	€ 0,00		0,0%
Uso de desgaste	€ 0,00		0,0%
Fertilizante (N)		€ 0,10	7,6%
Fertilizante (P)		€ 0,01	0,5%
Agua		€ 0,00	0,0%
Electricidad		€ 0,48	38,1%
labor LQ		€ 0,12	9,7%
labor HQ		€ 0,01	1,0%
Aguas residuales		€ 0,00	0,3%
Bienes capitales		€ 0,53	42,1%
Tierra		€ 0,01	0,8%
		€ 1,26	100,0%



**Figura 10.** Costos de producción total y venta de biomasa.

Fuente: (Autores)

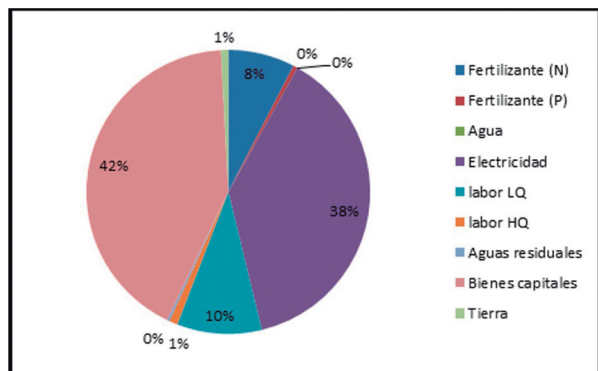


Figura 11. Porcentaje de valor de cada uno de los elementos en la producción.

Fuente: (Autores).

Como se puede observar en la Figura 11 el mayor costo para la producción de biomasa es el uso de todos los equipos con una participación del 42%, mientras que la electricidad y el agua observamos que su partición es del 38% y 1% respectivamente; este bajo costo se debe a que el agua en refinería es captado y su costo parte de unos permisos especiales que se dan al uso de este recurso.

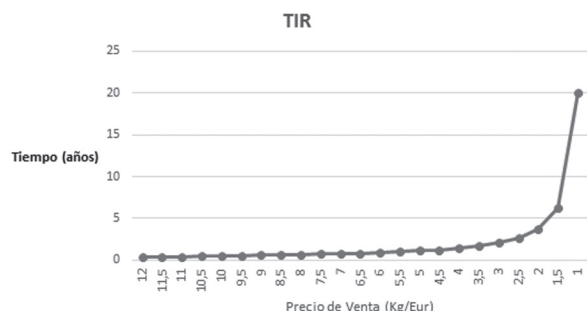


Figura 12. Efecto de la producción (kg/Eur) sobre tiempo.

Fuente: (Autores).

Una característica o ventaja que tiene esta calculadora es la facilidad que presenta el poder modificar ciertas variables y así conocer o identificar cuál de estas representan una mayor importancia para el uso en la producción de biomasa con el precio de venta (Figura 12) como se puede observar entre menor sea el precio de venta de la biomasa mayor será su tiempo de retorno para recuperar su inversión inicial y empezar a notar ganancias; si se vende la biomasa a un precio de de **3 Eur/Kg** el TIR será de 2,1 años pero si solo lo duplicamos a **6 Eur/Kg** el tiempo se reduce a 0,9 años; por lo tanto después de un precio mayor o igual de **11 Eur/kg** el TIR se mantendrá constante en **0,4 años ó 4,8 meses**.

Los datos presentados anteriormente permiten dilucidar que esta alternativa de captura y reciclaje de carbono presenta una viabilidad interesante, ya que durante los últimos años la producción de biomasa de microalgas como una fuente alternativa de productos de valor agregado se ha posicionado en diferentes mercados mundiales, por otra parte si se acoplara este proceso y se usaran aguas residuales de la refinería sería posible obtener un doble beneficio para la empresa (reducción en las emisiones de gases de efecto de invernadero y reducción en la emisión de contaminantes líquidos) siempre y cuando la biomasa sea explotada de forma sostenible tanto económica como ambiental (producción de fertilizantes de bajo costo, colorantes, etc.).

### CONCLUSIONES

- Se analizó el crecimiento de la *Clorella Vulgaris* en nueve sistemas cerrados con diferentes concentraciones de micro y macro nutrientes, en un periodo de 30 días fraccionado en dos ciclos. Los resultados obtenidos muestran que al aumentar la concentración de  $KNO_3$  existe una relación directamente proporcional en cuanto a la mayor producción de biomasa, mientras que si se aumentan las fuentes de fósforo ( $K_2PO_4$ ,  $KH_2PO_4$ ), esta producción no tiende a ser tan significativa.
- Los datos alcanzados mediante la aplicación de la calculadora EnAlgae open pond permiten conocer el aproximado costo de la implementación y operación de sistemas abiertos para el cultivo de *Clorella Vulgaris* a condiciones de Barrancabermeja, además se resalta que a mayor costo de venta de biomasa, menor será la tasa de retorno de dicha inversión.
- Los resultados de la capacidad de captura de dióxido de carbono, con base en los resultados de laboratorio, muestran que la cantidad de captura de  $CO_2$  es amplia a comparación de la cantidad de agua que se necesita para esta captura, ya que para una aproximación de captura de 1 tonelada se necesitan  $694 m^3$  de agua.

### RECOMENDACIONES

- Variar las concentraciones de macronutrientes para este experimento, aumentando el suministro en la fuente de nitrógeno como es el  $KNO_3$ , y disminuyendo las concentraciones de fuentes de fósforo.



- Debido a la escasez de agua que presenta el planeta se recomienda realizar los experimentos con aguas residuales. La buena adaptabilidad del microorganismo aplicado a ambientes pesados puede ser aprovechado con el fin de ahorrar el agua potable.
  - Realizar los experimentos a nivel macroscópico, es decir en una refinería en donde haya una gran emisión de dióxido de carbono, y evaluar que tan rentable puede ser la implementación de esta metodología.
  - Realizar una evaluación de financiera detalla de los costos iniciales, su utilidad neta e inversión así como sus criterios de evaluación como el payback, la tasa interna de retorno con el fin de determinar la factibilidad económica de este método de captura de CO<sub>2</sub>.
  - Hacer una comparación con otros tipos de microalgas bajo las mismas condiciones de laboratorio para hacer un análisis de qué tipo de microalgas es la más apta para los procesos de captura de CO<sub>2</sub> y producción de biomasa.
5. Eriksen, Nt., Riisgard, Fk., Gunther, Ws., Iversen, Jjl. (2007) On-line estimation of O<sub>2</sub> production, CO<sub>2</sub> uptake, and growth kinetics of microalgal cultures in a gas-tight photobioreactor. *J Appl Phycol*, Vol 1. 161–174.
  6. Fan, L., Zhang, Y., Cheng, L., Zhang, L., Tang, D. y Chen, H. (2007). Optimization of carbon dioxide fixation by *Chlorella vulgaris* cultivated in a membrane photobioreactor. *Chem. Eng. Technol*, Vol 8, 1094–9.
  7. Iverson, Tm. (2006). Evolution and unique bioenergetic mechanisms in oxygenic photosynthesis, *Curr. Opin. Chem. Biol*, Vol 10, 91–100.
  8. Jacob-Lopes, E., Lacerda, Lm. y Franco TT. (2008a). Biomass production and carbon dioxide fixation by *Aphanothece microscopica* Nägeli in a bubble column photobioreactor. *Biochem Eng J*, Vol 40, 27–34.
  9. Jacob-Lopes, E., Scoparo, CH., Franco, Tt. (2008b). Rates of CO<sub>2</sub> removal by *Aphanothece microscopica* Nägeli in tubular photobioreactors. *Chem Eng Process*, Vol 47, 1365–73.
  10. Kajiwara, S., Yamada, H., Narumasa, O. (1997). Design of the bioreactor for carbon dioxide fixation by *Synechococcus* PCC7942. *Energy Convers Manage*, Vol 38, 529–32.
  11. Kurano, N., Ikemoto, H., Miyashita, H., Hasegawa, H., Hata, T. y Miyachi S. (1995) Fixation and utilization of carbon dioxide by microalgal photosynthesis. *Ener Conver Manag*, Vol 36 (6), 689-692.
  12. Lee, Yk. y Hing Hk. (1989) Supplying CO<sub>2</sub> to photosynthetic algal cultures by diffusion through gas-permeable membranes. *Appl Microbiol Biotechnol*, Vol 31, 298–31.
  13. Petrobras. (2005) Management of atmospheric emissions. *Technical Report. Rio de Janeiro; 35p*. Recuperado de: [http://www2.petrobras.com.br/meio\\_ambiente/portugues/pdf/131205VersaoFinalPetrobrasInternet.pdf](http://www2.petrobras.com.br/meio_ambiente/portugues/pdf/131205VersaoFinalPetrobrasInternet.pdf).
  14. Qin, J. (2005). Bio-Hydrocarbons from microalgae Impacts of temperature, light and salinity on the algae growth. *A report for the rural industries*

## AGRADECIMIENTOS

Con el mayor de los gustos los autores de este trabajo tienen el honor de dar sus agradecimientos al Biólogo Andrés Barajas por el apoyo, acompañamiento y guía brindados en la elaboración y ejecución de este proyecto. A la Universidad de Santander.

## REFERENCIAS

1. Chae, Sr., Hwang, Ej. y Shin, Hs. (2006). Single cell protein production of *Euglena gracilis* and carbon dioxide fixation in an innovative photobioreactor. *Bioresour Techno*, Vol 97, 322–9.
2. Cheng, L., Zhang, L., Chen, H. y Gao C. (2006). Carbon dioxide removal from air by microalgae cultured in a membrane-photobioreactor. *Separ Purific Technol*, Vol 50, 324–9.
3. Chisti Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, Vol 25, 294 – 306.
4. Converti, A., Lodi, A., Del Borghi A. y Solisio, C. (2006). Cultivation of *Spirulina platensis* in a combined airlift-tubular reactor system. *Biochemical Engineering Journal*, Vol 32(1), 13–8.

- research and development corporation*; Australian Government.
15. Rados, S., Vaclav, B. y Frantisek, D. (1975). CO2 balance in industrial cultivation of algae. *Arch Hydrobiol, Vol 46*, 297–310.
16. Statsoft, Inc. Statistica (2004). (data analysis software system), version 7. Recuperado de: [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com). Viewed November 2007 [in Portuguese].
17. Wang, B., Li, Y., Wu, N. y Lan Cq (2008). CO2 bio-mitigation using microalgae. *Appl Microbiol Biotechnol, Vol 79*, 707–718.
18. Watanabe, Y., Ohmura, N. y Saiki, H. (1992). Isolation and determination of cultural characteristics of microalgae which Cuncnclions under CO2 enriched atmosphere. *Energy Conversion Management, Vol 33 (5-S)*, 545-52.

## NOMENCLATURA

CB	Cantidad de biomasa
DO	Densidad óptica
AFDW	Peso seco libre de cenizas
DW	Peso seco
DWAM	Peso seco después de la mufla

---

**Recepción:** 10 de marzo de 2017

**Aceptación:** 31 de mayo de 2017