

EVALUACIÓN DEL BIOPOLIMERO FO4990 EN LA FLOCULACIÓN DE
Chlorella vulgaris UTEX 1803

HENRY ALFREDO PEREZ ESLAVA
LUIS GUILLERMO RODRÍGUEZ MORENO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2014

**EVALUACIÓN DEL BIOPOLIMERO FO4990 EN LA FLOCULACIÓN DE
Chlorella vulgaris UTEX 1803**

**HENRY ALFREDO PEREZ ESLAVA
LUIS GUILLERMO RODRÍGUEZ MORENO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de:
Ingeniero Químico**

**Director
CRISOSTOMO BARAJAS FERREIRA
Ingeniero Químico M.Sc**

**Codirectores:
ANA MARIA ARDILA
Ingeniera Química**

**ANDRÉS FERNANDO BARAJAS
Biólogo**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2014**

DEDICATORIAS

Primeramente a Dios por darme sabiduría, entendimiento y fortaleza durante este largo camino, por levantarme y darme aliento en cada caída y enseñarme una valiosa lección detrás de cada una de ellas.

A mis padres, Vidal Pérez y Adela Eslava que con grandes esfuerzos estuvieron siempre presentes apoyándome y aconsejándome. A mis hermanos, Ciro Alfonso, Carlos Adres, Carmen Rosa, Gloria Inés y Luis Reymundo quienes con sus palabras me ayudaban a levantarme y me enseñaban que todo esfuerzo vale la pena. A todos mis familiares porque siempre estuvieron hay para enseñarme la importancia de tener una familia unida.

A mis amigos, Erika, Ángelo, Darwin, Astrid, Sussan, Diego, Wilberth, Leidy, Javier, Vivian, Diego y a mi amigo y compañero de proyecto Luis Guillermo que con sus oraciones, bromas, paseos, largas jornadas de estudio, hicieron más agradable este camino. A cada uno de ustedes mis mejores deseos y éxitos en sus vidas.

Henry Alfredo Pérez Eslava

En primer lugar agradezco a Dios, por ser la fuerza que me ayudó día a día bajo adversidades y triunfos.

A mi madre María Elizabeth, por el amor, la comprensión, por preocuparse de cada paso que he dado, guiarme por el camino correcto de la vida, estar a mi lado, todo el apoyo moral y espiritual brindado para mi éxito.

A mi padre Pablo Emilio, por cada esfuerzo y enseñanza, por estar junto a mí en momentos difíciles y mostrarme que la lucha por salir adelante depende de uno mismo, por todo el empeño puesto para que mi formación académica llegara hasta este grado de formación.

A mi hermana Elisa Margarita, Ingeniera Química de la Universidad Industrial de Santander, por estar todos los días dándome la fuerza, el ánimo para luchar, por no dejarme caer en momentos difíciles, enseñarme a ir más allá de lo que cualquiera ha ido, por ser mi ejemplo a seguir y apoyarme para que mi formación académica y profesional llegara a este grado de formación.

A mis amigos Hector Iván, Oliberth, Juan José, José Raúl, Erika Lorena, Astrid Nayibe, Julieth Angélica, Leydy Tatiana por haber compartido este proceso de estudio universitario y varios momentos que han servido para mi formación académica y personal.

A mi compañero de proyecto Henry Alfredo por haberme permitido trabajar en este gran proyecto y además de ser un compañero, un amigo, ser como un hermano más en mi vida.

A las demás personas que en una u otra forma aportaron grandes o pequeñas cosas para mi formación personal, académica y espiritual.

Luis Guillermo Rodríguez Moreno

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a:

M.Sc CRISOSTOMO BARAJAS FERREIRA por su respaldo como director del proyecto.

BIÓLOGO ANDRÉS FERNANDO BARAJAS SOLANO por su orientación, comprensión y apoyo para contribuir al buen desarrollo del presente proyecto.

ANA MARIA ARDILA ÁLVAREZ, por su enseñanza, ayuda y orientación durante la ejecución de las pruebas experimentales.

La Universidad Industrial de Santander, los profesores de Ingeniería Química y todas aquellas personas que hicieron parte de nuestra formación profesional.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
1. METODOLOGÍA	17
1.1 Cultivo y condiciones de cultivo	18
1.2 Diseño experimental	18
1.3 Floculación de microalgas con FO4990.....	19
1.4 Evaluación de eficiencia de floculación mediante aumento del volumen de cultivo.....	20
1.5 Extracción Soxhlet	20
2. RESULTADOS Y ANÁLISIS	21
2.1 Curva de crecimiento de microalga	21
2.2 Resultados con volumen de 100mL.....	21
2.3 Análisis estadístico	24
2.3.1 Superficies de respuesta.....	24
2.4 Resultados con un volumen de 500mL.....	26
2.5 Resultados de extracción soxhlet con 1L.....	29
3. CONCLUSIONES	31
4. RECOMENDACIONES.....	32
REFERENCIAS	33
BIBLIOGRAFÍA.....	35

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Diseño experimental	19
------------------------------------	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Metodología experimental.....	17
Figura 2. Curva de crecimiento de alga <i>Chlorella vulgaris</i>	21
Figura 3. Porcentaje de recuperación de biomasa a 100mL.....	22
Figura 4. Diagrama de Pareto de variables significativas.....	24
Figura 5. Superficie de respuesta. Relación concentración de floculante y agitación inicial	25
Figura 6. Superficie de respuesta. Relación concentración de floculante y agitación final.....	25
Figura 7. Superficie de respuesta. Relación agitación inicial y agitación final	26
Figura 8. Porcentaje de recuperación de biomasa a 500mL.....	27
Figura 9. Alga obtenida con una concentración de floculante de 3.26mg/L.....	29
Figura 10. Porcentaje de extracción de lípidos con diferente método de obtención de microalga.	30

RESUMEN:

EVALUACIÓN DEL BIOPOLIMERO FO4990 EN LA FLOCULACIÓN DE *Chlorella vulgaris* UTEX 1803*

AUTORES: HENRY ALFREDO PEREZ ESLAVA, LUIS GUILLERMO RODRÍGUEZ MORENO**

PALABRAS CLAVES: Microalgas, microorganismos, extracción, floculación, biomasa.

El estudio del biodiesel tiene un panorama bastante prometedor, ya que este ayuda a reducir el volumen de CO₂ y de gases de invernadero emitidos a la atmósfera al ser mezclados con los combustibles fósiles tradicionales. El uso de microalgas como la *Chlorella vulgaris*, que siendo un organismo fotosintético autótrofo unicelular, ha demostrado poseer gran cantidad de aceites vegetales siendo esta materia prima esencial para su obtención. El gran problema radica en encontrar un método económico de separación de la microalga del medio de cultivo. Para esto se aplican métodos de separación tales como centrifugación y sedimentación, los cuales tienen una eficiencia muy alta pero pueden ser muy costosos, por lo que se pretende comprobar como un método eficiente la floculación por medio de un biopolímero. Se hizo un diseño experimental en el software STATISTICA 7 para determinar condiciones de operación tales como concentración, agitación inicial y final de un floculante polimérico, teniendo como variable de respuesta el porcentaje de recuperación de biomasa y rendimiento de lípidos a pH neutro (7 ± 0.5), temperatura ambiente (25°C ± 1.5) y presión atmosférica.

Se concluyó que las condiciones óptimas para el polímero fueron concentraciones de 3 - 4 mg/L de floculante, agitación de mezclado inicial de 500 rpm durante 40 segundos y agitación final de 200 rpm durante 5 minutos, se recuperó por encima del 90% de la microalga del medio de cultivo y un rendimiento de lípidos de 6.41%, además que el tiempo de floculación máxima para todos los casos es un mismo rango de tiempo (2,5 a 3 horas).

* Proyecto de grado.

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería química. Director: M.Sc Crisóstomo Barajas Ferreira. Codirector (es): Ana María Ardila; Andrés Fernando Barajas Solano.

ABSTRACT

TITLE: BIOPOLYMER ASSESSMENT IN FO 4990 FLOCCULATION OF *Chlorella vulgaris* UTEX 1803*

AUTHORS: HENRY ALFREDO PEREZ ESLAVA, LUIS GUILLERMO RODRÍGUEZ MORENO**

KEYWORDS: *microalgae, microorganisms, extraction, flocculation, biomass.*

The study of biodiesel has a very promising outlook, as it helps to reduce the volume of CO₂ and greenhouse gases emitted into the atmosphere when mixed with traditional fossil fuels. Using microalgae *Chlorella vulgaris* as that being a photosynthetic unicellular autotrophic organism, has demonstrated great quantity of vegetable oils being these essential raw material for their production. The major problem is to find an economical method of separating the microalga culture medium. For this separation methods such as centrifugation and sedimentation are applied, which have a very high efficiency but can be very expensive, which is to check as an efficient flocculation method using a biopolymer. It was an experimental design in STATISTICA 7 software to determine operating conditions such as concentration, initial agitation and end of a polymeric flocculant, with the response variable recovery rates of biomass and lipid yield at neutral pH (7 ± 0.5), environment (25 ± 1.5 ° C) and atmospheric pressure.

It was concluded that the optimum conditions for the polymer were concentrations of 3-4 mg / L of flocculant agitation initial mixing of 500 rpm for 40 seconds and final agitation of 200 rpm for 5 minutes recovered over 90% of the microalgae culture medium and lipid yield of 6.41%, in addition to the maximum flocculation time for all cases is the same time range (2.5 to 3 hours).

* Graduation project

** Physical-Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering department. Director: M. Sc Crisóstomo Barajas Ferreira. Co-director: Ana María Ardila; Andrés Fernando Barajas Solano.

INTRODUCCIÓN

Recientemente, las microalgas han recibido mucha atención como una biomasa atractiva para la producción de biocombustibles. Además de su potencial como alternativa para biocombustibles y bioproductos, las microalgas también contribuyen a la calidad del medio ambiente, ya que estos organismos pueden fijar el CO₂ de la atmósfera y por lo tanto contribuir a reducir gases de efecto invernadero [1]. El cultivo de microalgas con miras a la obtención de biocombustibles como el biodiesel posee distintas etapas entre las cuales se destacan como las más importantes la cosecha, extracción y procesamiento del aceite. Los mecanismos de cosecha, como la centrifugación, sedimentación y floculación son eficientes, pero al mismo tiempo son costosos [2]. Cuando se producen microalgas con miras a la obtención de productos de alto valor agregado la concentración de esta se realiza por centrifugación [3]; Sin embargo, si se va a utilizar para productos de bajo valor como los biocombustibles es demasiado costosa por el alto consumo energético requerido debido a los grandes volúmenes de cultivo que necesitan ser procesados [4]. A pesar de los diversos beneficios asociados a la producción de biocombustibles a partir de microalgas, una viabilidad económica de esta industria comparable a la del sector petrolero y la industria del bioetanol todavía no se ha logrado [5]. De ahí las investigaciones han llegado a determinar como un proceso eficiente para la extracción de las microalgas, el pre-concentrado de ellas por medio de la floculación [4,6]. La floculación es un proceso de baja energía, pero puede ser costosa por el tipo de floculante y la dosis necesarias; dentro de estos sistemas la mayoría emplean floculantes económicos, como cloruro férrico, sulfato de aluminio, quitosán y diversos floculantes poliméricos [7]. Durante la floculación, las células individuales forman agregados más grandes que pueden ser separadas del medio por sedimentación, además de un método mecánico de deshidratación tal como centrifugación, para obtener materia seca [8], los

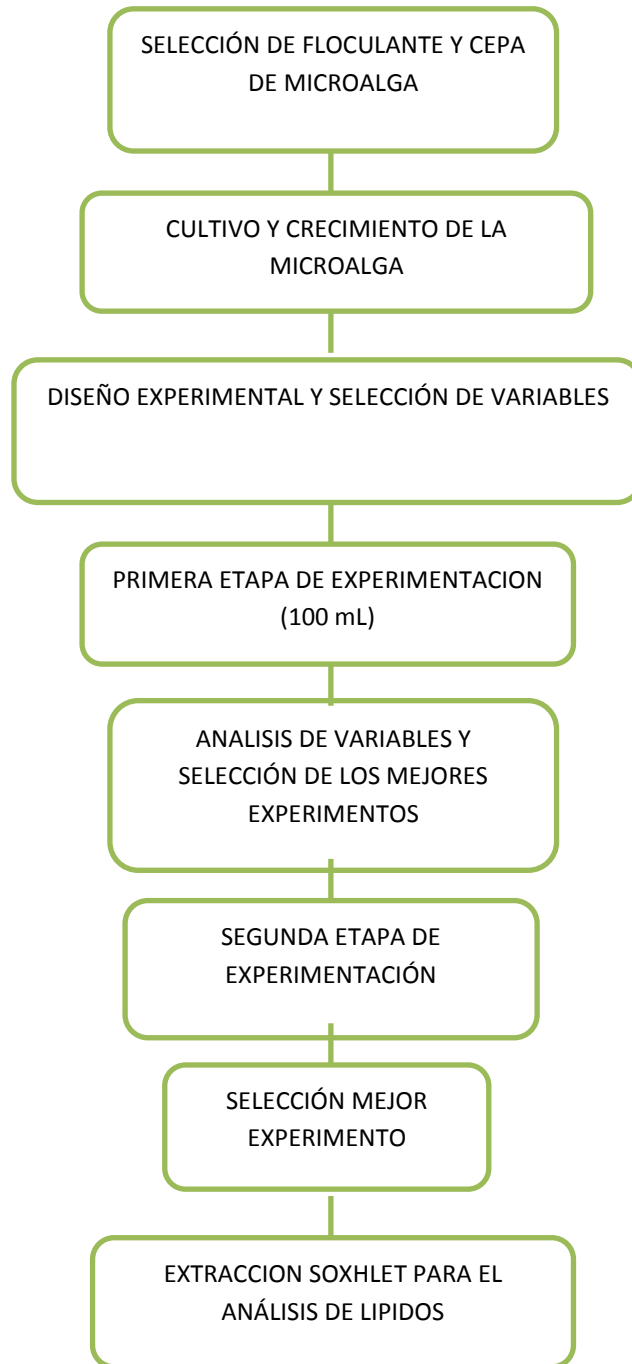
requerimientos de energía son aceptables porque las partículas son relativamente grandes y los volúmenes de agua para ser procesadas pequeña [9]. Los floculantes poliméricos son los más usados, sin embargo estos pueden contener trazas tóxicas y por lo tanto también contaminar la biomasa de microalgas [10]. Una alternativa más segura es el uso de floculantes basados en biopolímeros catiónicos naturales [11], ya que estos son capaces de interactuar con la carga superficial negativa de las células de microalgas. Un conocido biopolímero catiónico es el quitosano el cual requiere de un pH bajo para obtener las mayores eficiencias de remoción, sin embargo la mayoría de los cultivos microalgales poseen un pH relativamente alto, por lo cual se requiere de un ajuste de este previo al proceso [12]. Otro de los más utilizados es el sulfato de aluminio (alumbre), debido a la facilidad de uso y la aplicación; sin embargo no se puede aplicar sobre un amplio rango de pH [13,14].

Otro de los factores que influyen en la concentración de microalgas mediante floculación es la dosis de este y su relación con la concentración de biomasa a concentrar y el medio de cultivo (agua marina ó agua dulce) [14]. Garzon-Sanabria *et al* [11] probaron algunos compuestos como el cloruro de aluminio ($AlCl_3$), quitosán y cinco polímeros catiónicos sintéticos de pesos moleculares y densidad de carga diferentes que se utilizaron como agentes de floculación en la concentración de una cepa marina de *Nannochloropsis* sp; encontrando que el polímero FO4990 fue el más eficiente.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la eficiencia del polímero FO4990 en *Chlorella vulgaris* UTEX 1803, buscando obtener las variables más influyentes en la concentración de la biomasa de esta cepa y su efecto posterior en la extracción de los lípidos.

1. METODOLOGÍA.

Figura 1. Metodología experimental



1.1 Cultivo y condiciones de cultivo de microalga *Chlorella vulgaris*

Chlorella vulgaris UTEX 1803 proveniente de la colección de cultivo de microalgas de la Universidad de Texas (UTEX). la cepa se cultivó en medio Bold basal, cuya composición de macronutrientes en mg/L es: NaNO₃ (2,94), MgSO₄.7H₂O (3,04 X 10⁻¹), NaCl (4,28 X 10⁻¹), K₂HPO₄ (4,31 X 10⁻¹), KH₂PO₄ (1,29), CaCl₂.2H₂O (1,70 X 10⁻¹) y micronutrientes en mg/L: ZnSO₄.7H₂O (3,07 X 10⁻²), MnCl₂.4H₂O (7,28 X 10⁻³), MoO₃ (4,93 X 10⁻³), CuSO₄.5H₂O (6,29 X 10⁻³), Co (NO₃)₂.6H₂O (1,68 X 10⁻³), H₃BO₃ (1,85 X 10⁻¹), EDTA (1,71 X 10⁻¹), KOH (5,53 X 10⁻¹), FeSO₄.7H₂O (1,79 X 10⁻²). Se trabaja con reactores planos con capacidad de 2 litros, a temperatura ambiente (25°C±1.5), con pH neutro, aireación constante y periodo de luz 12/12. Para la inoculación se agregó 1g/L de biomasa húmeda en los fotobiorreactores.

1.2 Diseño experimental

Para el diseño de experimentos se tomó como referencia el trabajo realizado por Garzón-Sanabria *et al.* [11], se utilizó la herramienta informática STATISTICA 7.0. El diseño es una composición central no factorial de 3³ de 15 experimentos (Tabla 1). Con el fin de analizar cómo afecta la concentración de floculante, agitación inicial y agitación final en el proceso de floculación.

Tabla 1. Diseño experimental

EXPERIMENTO	CONCENTRACIÓN FLOCULANTE mg/L	AGITACIÓN INICIAL (rpm)	AGITACIÓN FINAL (rpm)
1	20	500	32,6
2	20	500	200
3	10	250	100
4	20	918	200
5	30	250	100
6	10	250	300
7	30	250	300
8	10	750	300
9	10	750	100
10	30	750	100
11	20	81,67	200
12	30	750	300
13	3,26	500	200
14	20	500	367,3
15	36,73	500	200

1.3 Floculación de microalgas con FO4990

Para el procedimiento se tomó 100 mL de biomasa en vasos de precipitado de vidrio de 250 mL (1 original y 2 réplicas) por cada experimento; se adicionó la cantidad de floculante a cada muestra a partir de una solución fresca de FO4990 con una concentración de 1 g/L. El tiempo de agitación inicial y final (40 segundos y 5 minutos respectivamente) se mantuvieron constantes durante todos los experimentos.

Durante 5 horas cada 30 minutos se tomó una muestra para corroborar la concentración de biomasa el uso de un espectrofotómetro (Spectroquant Pharo 300, Merck) a una longitud de onda de 500 nm siguiendo una curva de concentración previamente desarrollada en el laboratorio de biomasa del grupo de investigación CIDES.

1.4 Evaluación de eficiencia de floculación mediante aumento del volumen de cultivo.

Una vez obtenidas las mejores condiciones de floculación, se realizaron pruebas aumentando el volumen hasta 1000 mL pasando por 500 mL.

1.5 Extracción soxhlet

Una vez obtenida la biomasa concentrada mediante las mejores condiciones se realizó un análisis de la eficiencia de extracción de los lípidos mediante la metodología de Soxhlet [15]; como medio de control se utilizó biomasa concentrada por medio de centrifugación.

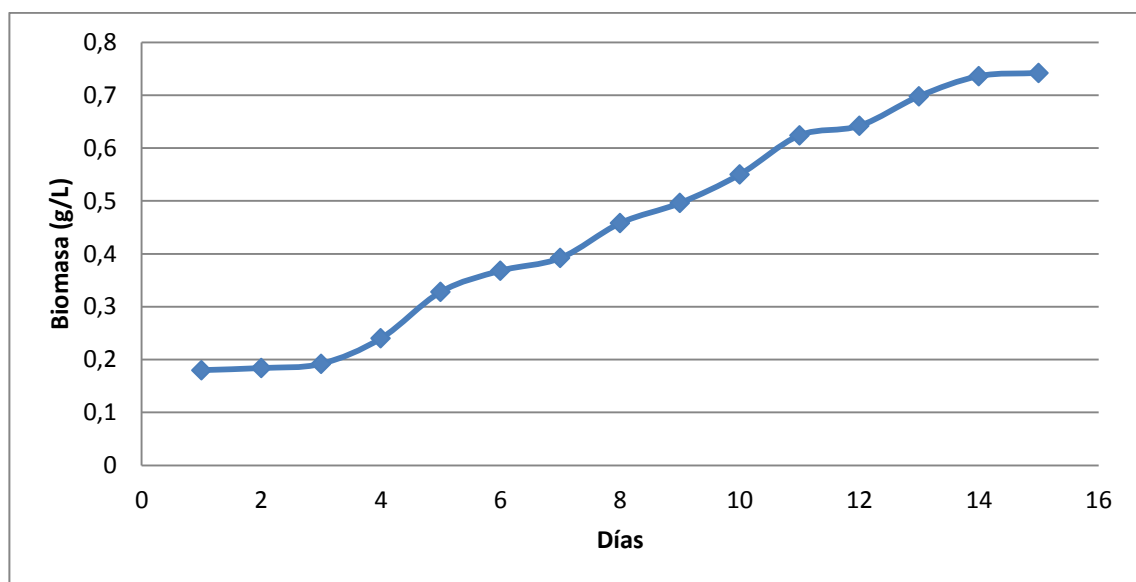
El equipo de extracción, consta de un matraz, un tubo Soxhlet y un condensador. El proceso se realizó para una muestra original y una réplica, la biomasa recuperada por floculación se llevó al horno durante 24 horas y a 105°C para su secado. La biomasa ya seca fue macerada, pesada y envuelta en un cartucho de papel filtro e introducida al tubo Soxhlet. El matraz vacío fue pesado y llenado con 250 mL de hexano como solvente y fue montado en una manta de calentamiento junto con el tubo Soxhlet y el condensador. El tiempo total del proceso fue de 16 horas regulando el flujo de agua y manteniendo la temperatura a 69°C. Una vez terminado, el matraz que contenía una mezcla de extracto lipídico y solvente se llevó a un proceso de evaporación para recuperar el solvente y concentrar el extracto en el matraz.

2. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

2.1 Curva de crecimiento *C. vulgaris*

En la primera etapa se realizó el crecimiento de la biomasa bajo las condiciones descritas anteriormente. Podemos observar que el tiempo óptimo de crecimiento de *Chlorella vulgaris* es de 15 días y la concentración de biomasa es directamente proporcional al tiempo de cultivo (Figura 2).

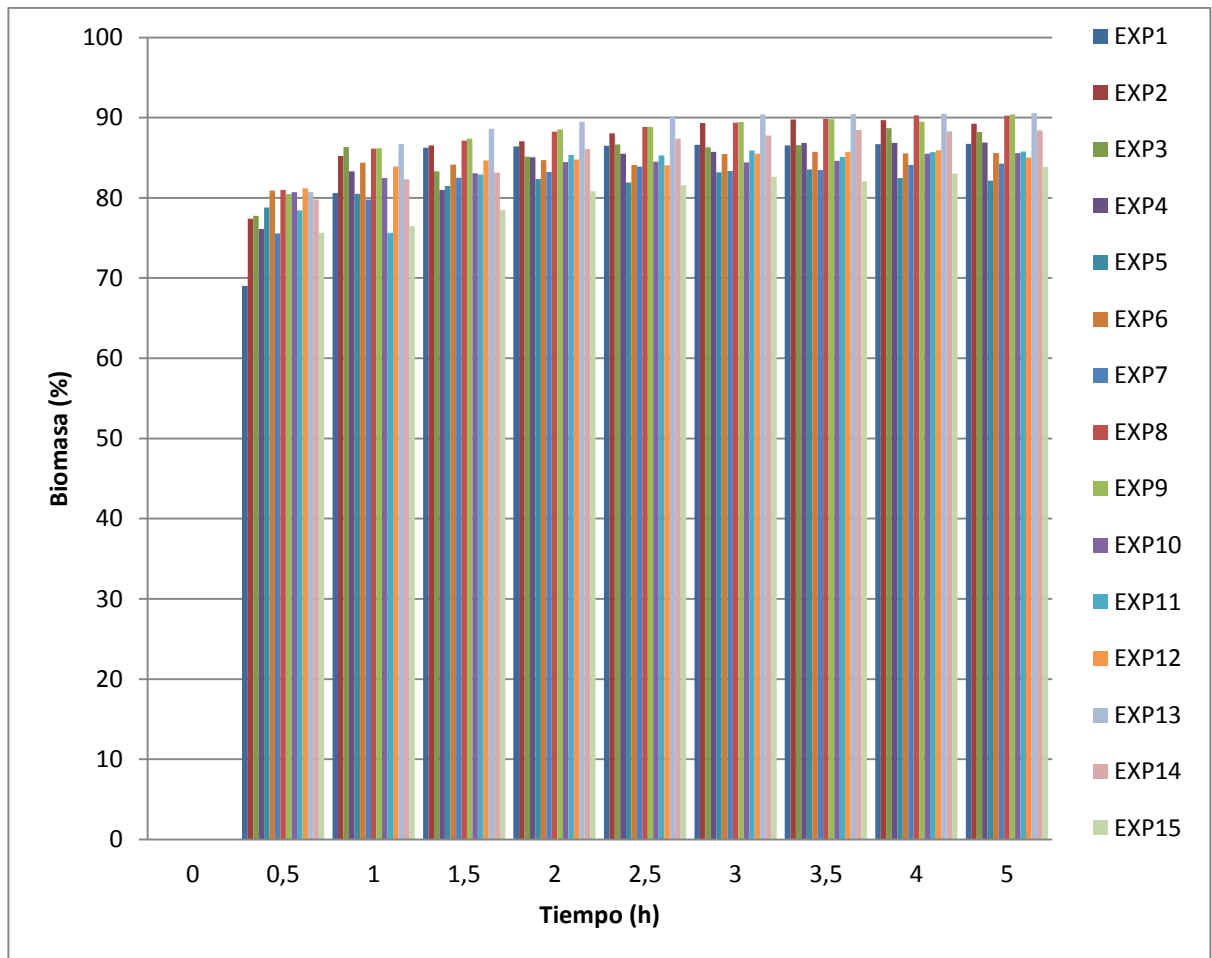
Figura 2. Curva de crecimiento del alga *Chlorella vulgaris*



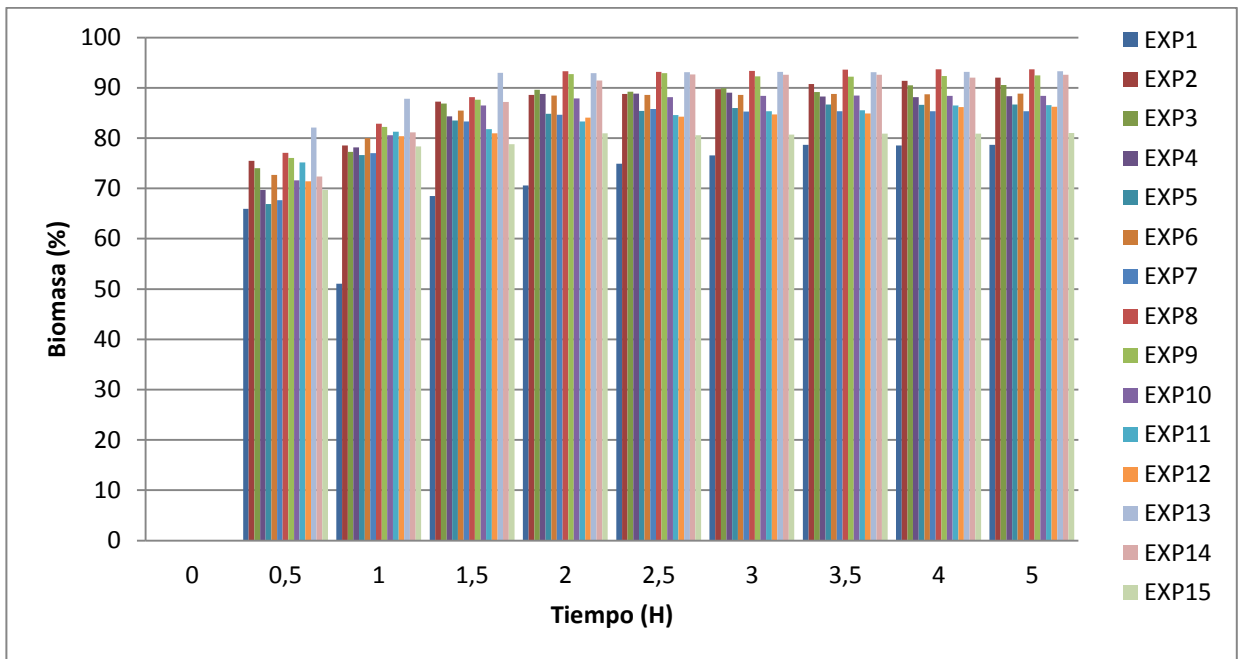
2.2 Resultados de la floculación con un volumen de 100 ml

La floculación con el polímero FO4490 se hizo en base a la metodología propuesta, estas pruebas se realizaron durante 5 días (Figura 3a), 10 días (Figura 3b) y 15 días (Figura 3c) de crecimiento de biomasa. Se observó que el mayor porcentaje de recuperación de biomasa se da en los experimentos: 2, 3, 8, 9, 13 y 14. Se obtuvo un 90% de recuperación de biomasa en promedio, seleccionando los experimentos nombrados para realizar la floculación a un mayor volumen. Para los 5, 10 y 15 días, se observó que los mismos experimentos eran los que tenían mayor porcentaje de recuperación.

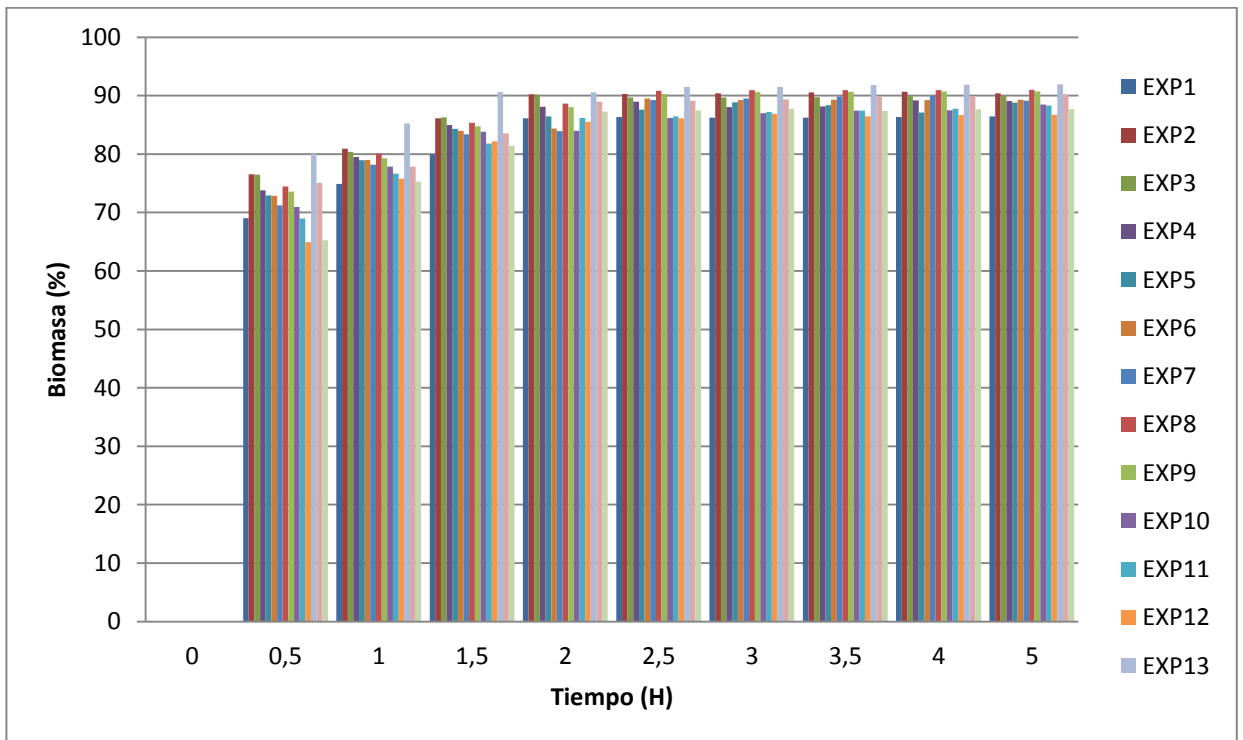
Figura 3. Porcentaje de recuperación de biomasa a un volumen de 100 ml. **3a** 5 días. **3b** 10 días. **3c** 15 días



(a)



(b)

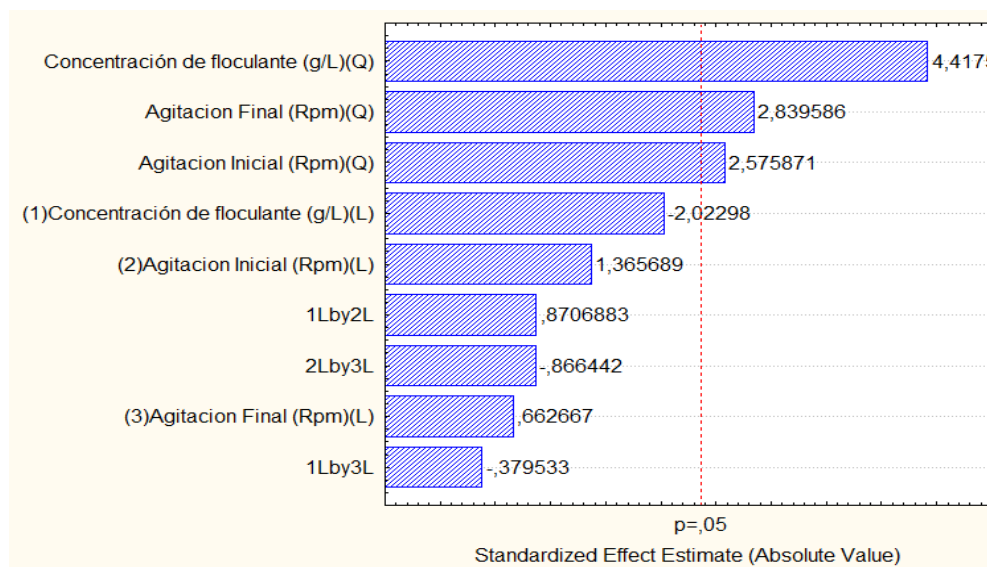


(c)

2.3 Análisis estadístico

Con la ayuda del programa STATISTICA 7 se analizó la influencia de variables como agitación inicial, agitación final y concentración de floculante. Se obtuvo los diagramas de Pareto que determinan las variables significativas. Se observó que todas las variables pasan el umbral, es decir, la línea roja ($p=,05$) (Figura 4), según el diagrama de Pareto la concentración de floculante es la variable de mayor importancia en el proceso, aunque las demás variables tienen una influencia significativa en el proceso.

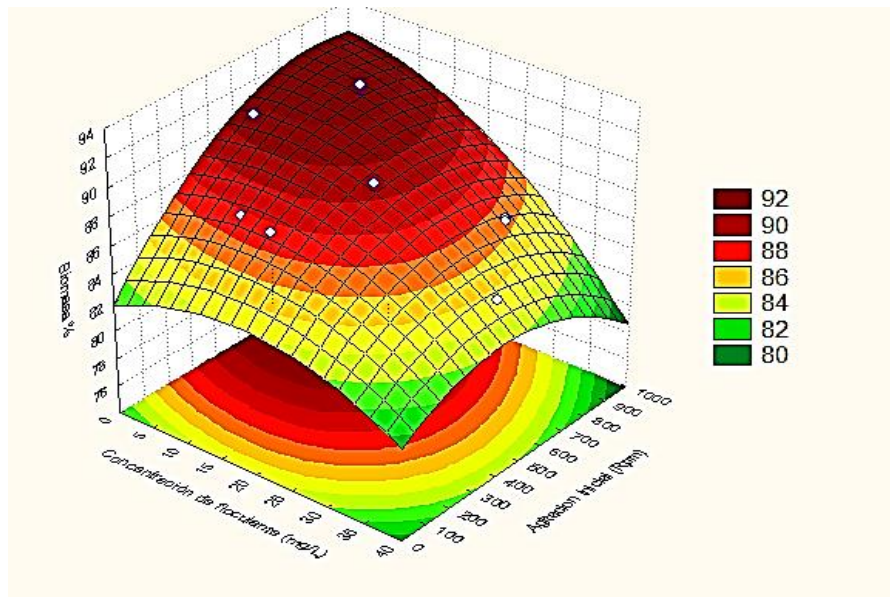
Figura 4. Diagrama de Pareto de variables significativas.



2.3.1 Diagramas de superficie de respuesta

En la **Figura 5**, se observó que al efectuar una agitación inicial mayor a 500 rpm y una concentración de floculante menor a 10 mg/L el porcentaje de recuperación de biomasa es mayor al 90%. Se demostró que el biopolímero catiónico FO4990 en dosis bajas pueden inducir la floculación eficiente *C. vulgaris*, en un volumen de 100 mL de biomasa.

Figura 5. Superficie de respuesta. Relación concentración de floculante y agitación inicial.



En la **Figura 6**, se observa que las mejores condiciones de floculación están a una agitación final de 200 rpm y una concentración de floculante menor a 10 mg/L, logrando una eficiencia superior del 90% en la recuperación de biomasa.

Figura 6. Superficie de respuesta. Relación concentración de floculante y agitación final.

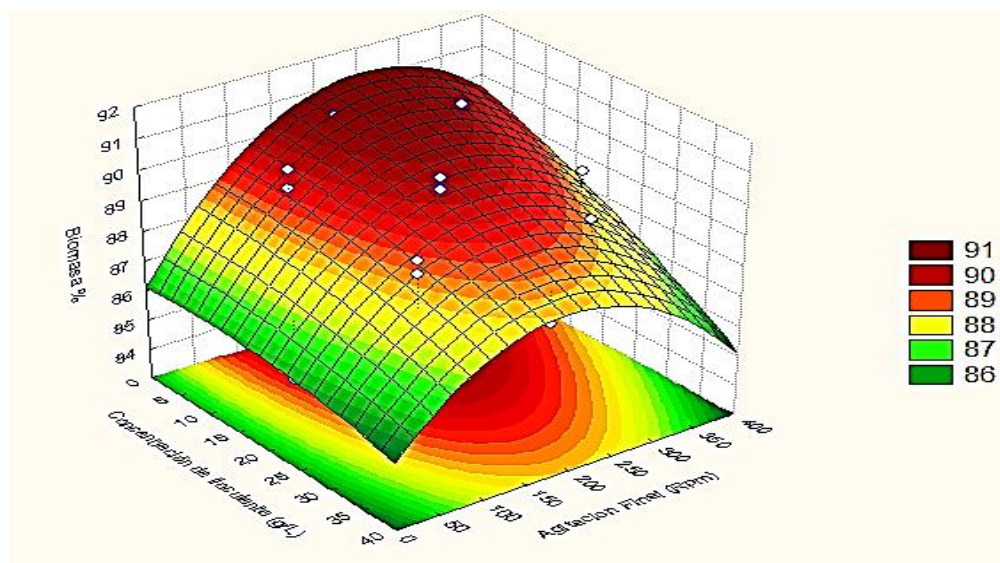
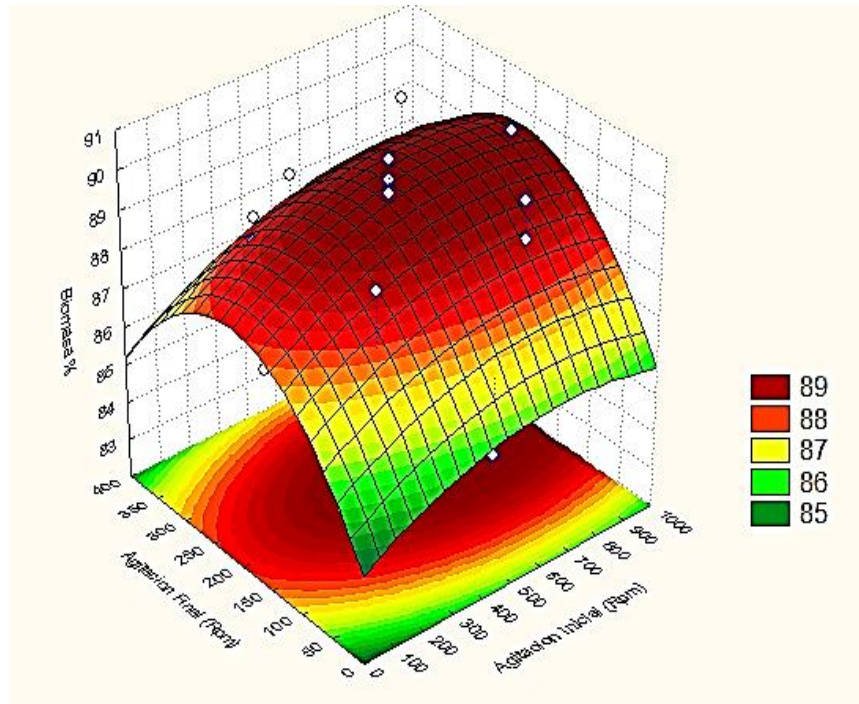


Figura 7. Superficie de respuesta. Relación agitación inicial y agitación final



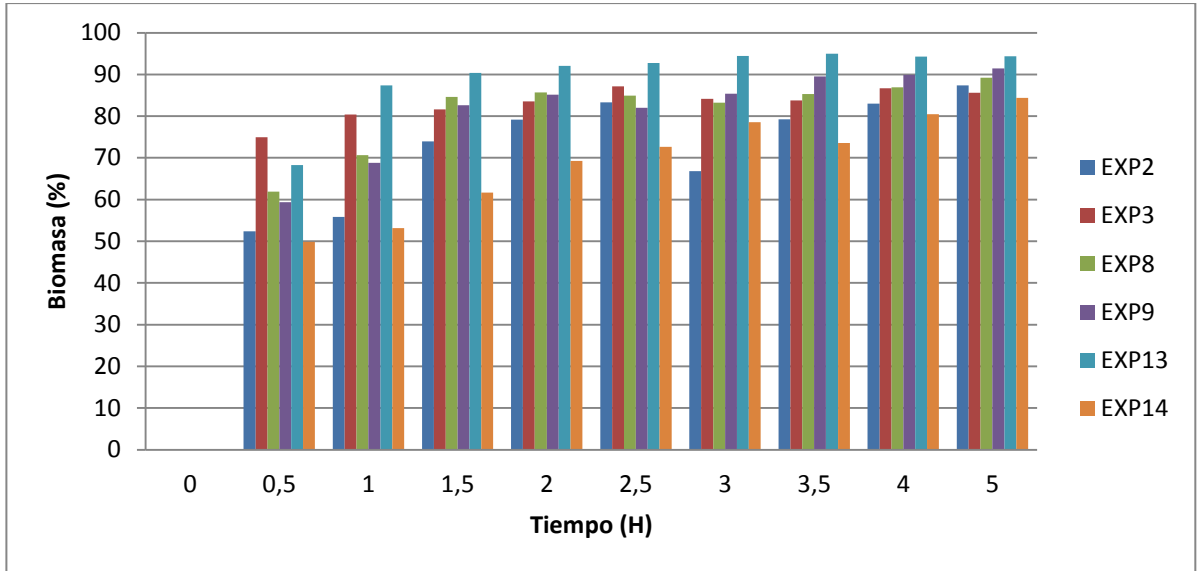
La relación entre las variables de agitación para recuperación de biomasa más alta se presenta cuando las agitaciones iniciales son mayores a 500 rpm y las agitaciones finales próximas a 200 rpm, obteniendo una eficiencia en la separación de la microalga de su medio de cultivo de 90% (Figura 7). Corroborando lo propuesto por *Garzón-Sanabria et al* [11], para la agitación inicial y final en el proceso de floculación.

2.4 Resultados de floculación a un volumen de 500 mL

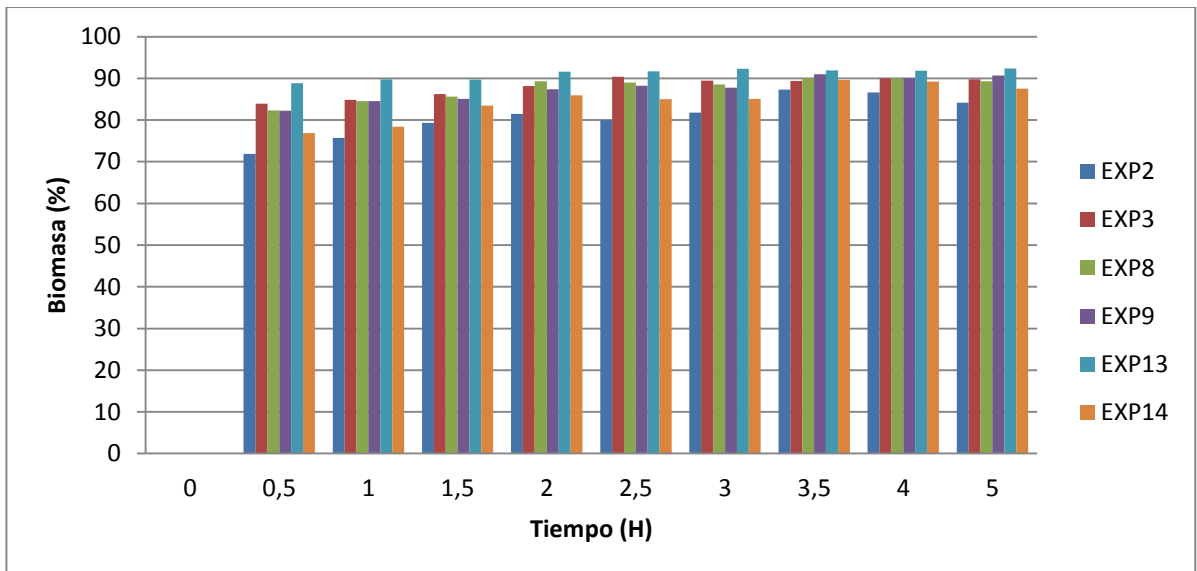
Los experimentos 2, 3, 8, 9, 13 y 14 se escalaron a un volumen de 500 mL, como resultado se observó que el experimento con mayor recuperación de biomasa es el experimento 13, que corresponde a una concentración de floculante de 3,26 mg/L, con una agitación inicial de 500 rpm y 200 rpm de agitación final (Figuras 8a, 8b y 8c). Se concluyó que el floculante FO4990 presenta un alto rendimiento independiente del tiempo de crecimiento de la microalga y el volumen de biomasa.

Como dato adicional se concluyó que en tanto aumenta el tiempo de floculación mejora el porcentaje de biomasa floculada llegando a ser estable entre las 2.5 y 3 horas tal como lo muestra Graficas 8a, 8b y 8c

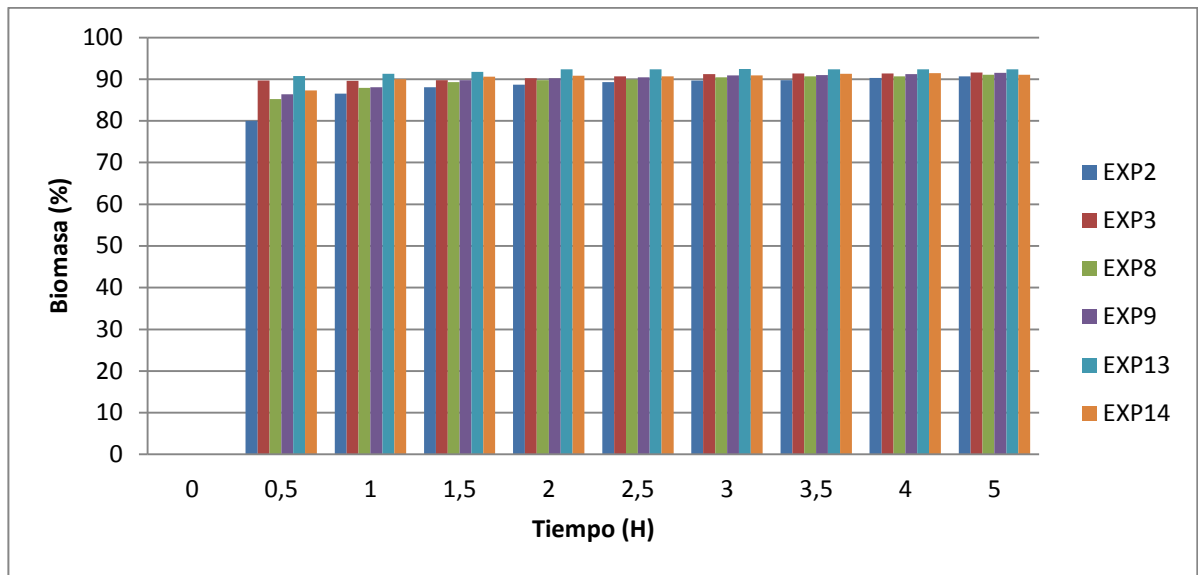
Figura 8. Porcentaje de biomasa a un volumen de 500 ml. 8a 5 días. 8b 10 días. 8c 15 días.



(a)



(b)



(c)

En la Figura 9 se muestra el mejor experimento (experimento 13) después de 2,5 horas desde que se adicionó el floculante y se encontró un rendimiento superior al 90% (Figura 8). Resultados obtenidos en otros estudios reportan porcentajes de recuperación del 90% con polímeros catiónicos entre 20-30 mg/L aplicados a algas de agua marina [11], de esta forma se comprueba la efectividad de los floculantes poliméricos. Se observó que la cantidad de floculante usada por Garzón-Sanabria *et al.* [11] es demasiado alta comparada con la obtenida para flocular *C. vulgaris* (3,26 mg/L) debido al medio de cultivo y las características de las cepas.

Figura 9. Alga obtenida con una concentración de floculante de 3.26 mg/L



2.5 Resultados de Extracción Soxhlet con 1 L

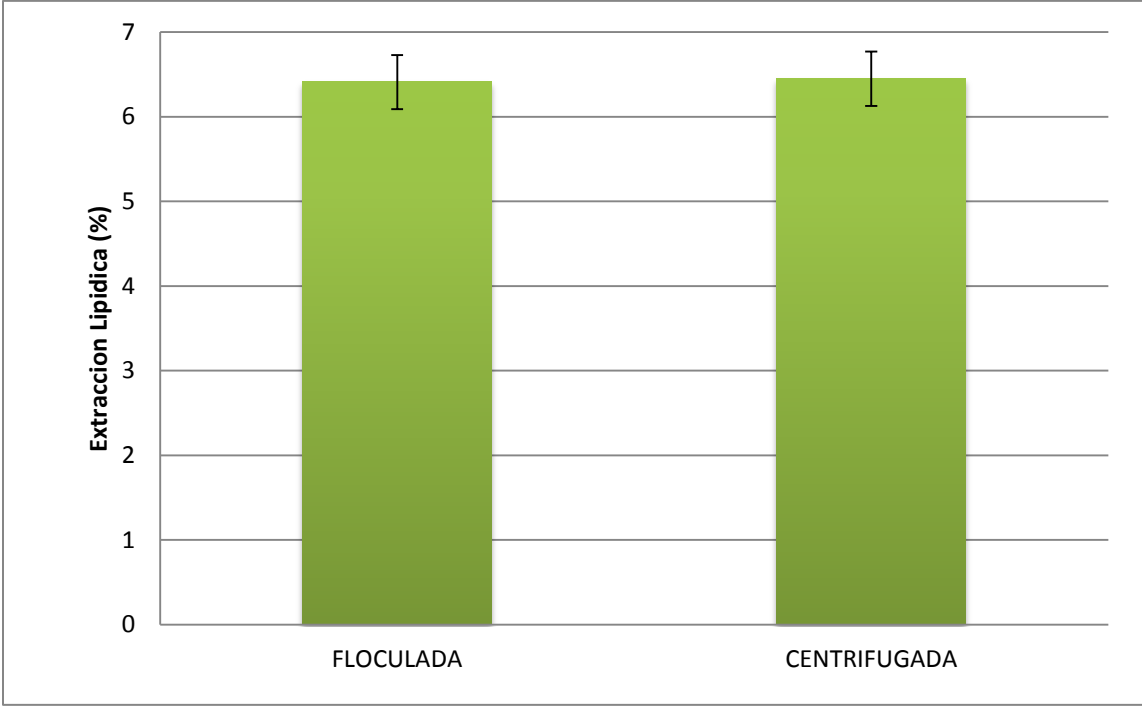
Para realizar el cálculo del rendimiento en la obtención de lípidos se hace mediante la ecuación 1.

$$\text{Extracto lipídico \%} = \frac{\text{Masa final del matraz} - \text{masa inicial del matraz}}{\text{masa inicial de la muestra}} * 100 \quad (\text{Ec 1})$$

Se realizó la extracción Soxhlet utilizando hexano y se obtuvo un rendimiento del 6,41% para la biomasa floculada con polímero FO4490 y para biomasa obtenida mediante el método de centrifugación se obtuvo un rendimiento de 6,45% (Figura 10). El método de centrifugación es más eficiente para separar la microalga de su medio de cultivo, pero más costoso que proceso de floculación con polímero FO4990 y se obtuvo una diferencia en la extracción de lípidos muy baja (0.04%) se concluyó que la floculación con biopolímeros para *C. vulgaris* es eficiente. El uso de hexano como solvente para la extracción de lípidos obtiene un rendimiento del 6,8% [16]. Comparado los resultados obtenidos de 6,41% se obtuvo una eficiencia de extracción (ecuación 2) de lípidos del 94.26% según el solvente usado.

$$\text{Eficiencia de extracción} = \frac{\text{Porcentaje experimental}}{\text{Porcentaje teórico}} * 100 \quad (\text{Ec 2})$$

Figura 10. Porcentaje de extracción de lípidos con diferente método de obtención del alga.



3. CONCLUSIONES

Se logró obtener la relación entre las condiciones de agitación inicial, agitación final y concentración de floculante, para la mayor obtención de biomasa utilizando el floculante FO4990 estas deben ser altas para la agitación inicial y bajas para la agitación final.

Se estableció un rango en el cual la concentración de floculante presenta una máxima recuperación de microalga (Mayor de 90%) sin importar el volumen de biomasa. Además de demostró que el floculante polimérico presenta un alto rendimiento en el proceso de floculación del alga *C. vulgaris*.

El análisis estadístico de los resultados mostro que la mayor cantidad de biomasa recuperada se presenta bajo las condiciones concentración de floculante bajas (3,26), agitación inicial promedio 500 rpm y agitación final 200 rpm.

Se logró demostrar el alto desempeño del polímero FO4990 para la floculación del alga *Chlorella vulgaris* ya que necesita concentraciones bajas para lograr excelentes resultados.

4. RECOMENDACIONES

Proponer un diseño experimental con concentraciones de floculante menores a las estudiadas en el presente trabajo, con el propósito de encontrar un rango para la utilización del polímero FO4990.

Debemos involucrar otras variables influyentes en la floculación como son el pH, con el objetivo de mejorar el porcentaje de biomasa obtenido.

REFERENCIAS

- 1** Lim, C.Y., Gursong, Y., Chen, C.L., Wang, J.Y., 2013. A strategy for urban outdoor production of high-concentration algal biomass for 33 alif biorefining. *Bioresource technology* 135, 175-181.
- 2** Jungmin, K., Gursong, Y., Hansol, L., Juntaek, L., Kyochan, K., Chul Woong, K., Min, S.P., Ji-Won. Y., 2013. Methods of downstream processing for the production of biodiesel from microalgae. *Biotechnology advances* 31, 862-876.
- 3** Gerde, J.A., Yao, L., Lio, J.Y., Wen, Z., Wang, T., 2013. Microalgae flocculation: Impact of flocculant type, 33alifornia33es and cell concentration. *Algal research* 3, 30-35.
- 4** Brentner, L.B., Eckelman, M.J., Zimmerman, J.B., 2011. Combinatorial life cycle assessment to inform process design of industrial production of algal biodiesel. *Environ. Sci. Technol.* 45, 7060–7067
- 5** Grobbelaar, J.U., 2013. Inorganic algal nutrition. En Richmond, Amos y Qiang, Hu. (Coord.), *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology, Second Edition (pp.123-132)*. South Africa: Bloemfontein.
- 6** Pienkos, P.T. and Darzins, A., 2009. The promise and challenges of microalgal-derived biofuels. *Biofuels Bioprod. Bioref.* 3, 431–440.
- 7** Henderson, R.K., Baker, A., Parsons, S.A., Jefferson, B., 2008. Characterisation of algogenic organic matter extracted from cyanobacteria, green algae, and diatoms. *Water Res.* 42, 3435–3445.
- 8** Vandamme, D., Foubert, I., Muylaert, K., 2012. Flocculation as a low cost method for harvesting microalgae for bulk biomass production. *Trends in biotechnology* 31, 233-239.
- 9** Schlesinger, A., Eisenstadt, D., Bar-Gil, A., Carmely, H., Einbinder, S., Gressel, J., 2012. Inexpensive non-toxic flocculation of microalgae contradicts theories; overcoming a major hurdle to bulk algal production. *Biotechnol. Adv.* 30, 1023–1030.
- 10** Bratby, J., 2006. *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*, IWA Publishing.
- 11** Garzon-Sanabria, A.J., Ramirez-Caballero, S.S., Moss, F.E.P., Nikolov, Z.L., 2013. Effect of algogenic organic matter (AOM) and sodium chloride on *Nannochloropsis salina* flocculation efficiency. *Bioresource technology* 143, 231-237.

- 12** Chang, Y-R., Lee, D-J., 2012. Coagulation–membrane filtration of *Chlorella vulgaris* at different growth phases. *Drying Technol.* 30, 1317–1322.
- 13** Ebeling, J.M., Sibrell, P.L., Ogden, S.R., Summerfelt, S.T., 2003. Evaluation of chemical coagulation–flocculation aids for the removal of suspended solids and phosphorus from intensive recirculating aquaculture effluent discharge. *Aquacultural Engineering* 29 (1–2), 23–42.
- 14** Granados, M.R., Acién, F.G., Gómez, C., Fernández-Sevilla, J.M., Molina Grima, E., 2012. Evaluation of flocculants for the recovery of freshwater microalgae. *Bioresource technology* 118, 102-110.
- 15** Ramesh, D., 2013. Lipid Identification and Extraction Techniques. *Biotechnological Applications of microalgae (pp.89-98)*. University of California: San diego.
- 16** Cordoba, L.E., Lopez,L.M., 2010. Obtención de aceite de microalgas nativas mediante la combinación de disrupción y método de extracción soxhlet para la producción de biodiesel. Tesis ingeniería. Escuela Ing. Química, Univ. Industrial de Santander. 37 p.

BIBLIOGRAFÍA

- Bratby, J., 2006. Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment, IWA Publishing.
- Brentner, L.B., Eckelman, M.J., Zimmerman, J.B., 2011. Combinatorial life cycle assessment to inform process design of industrial production of algal biodiesel. *Environ. Sci. Technol.* 45, 7060–7067.
- Chang, Y-R., Lee, D-J., 2012. Coagulation–membrane filtration of *Chlorella vulgaris* at different growth phases. *Drying Technol.* 30, 1317–1322.
- Cordoba, L.E., Lopez, L.M., 2010. Obtención de aceite de microalgas nativas mediante la combinación de disrupción y método de extracción soxhlet para la producción de biodiesel. Tesis ingeniería. Escuela Ing. Química, Univ. Industrial de Santander. 37 p.
- Ebeling, J.M., Sibrell, P.L., Ogden, S.R., Summerfelt, S.T., 2003. Evaluation of chemical coagulation–flocculation aids for the removal of suspended solids and phosphorus from intensive recirculating aquaculture effluent discharge. *Aquacultural Engineering* 29 (1–2), 23–42.
- Garzon-Sanabria, A.J., Ramirez-Caballero, S.S., Moss, F.E.P., Nikolov, Z.L., 2013. Effect of algogenic organic matter (AOM) and sodium chloride on *Nannochloropsis salina* flocculation efficiency. *Bioresource technology* 143, 231-237.
- Gerde, J.A., Yao, L., Lio, J.Y., Wen, Z., Wang, T., 2013. Microalgae flocculation: Impact of flocculant type, algae species and cell concentration. *Algal research* 3, 30-35.
- Granados, M.R., Acién, F.G., Gómez, C., Fernández-Sevilla, J.M., Molina Grima, E., 2012. Evaluation of flocculants for the recovery of freshwater microalgae. *Bioresource technology* 118, 102-110.
- Grobbelaar, J.U., 2013. Inorganic algal nutrition. En Richmond, Amos y Qiang, Hu. (Coord.), *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology, Second Edition (pp.123-132)*. South Africa: Bloemfontein.
- Henderson, R.K., Baker, A., Parsons, S.A., Jefferson, B., 2008. Characterisation of algogenic organic matter extracted from cyanobacteria, green algae, and diatoms. *Water Res.* 42, 3435–3445.

- Jungmin, K., Gursong, Y., Hansol, L., Juntaek, L., Kyochan, K., Chul Woong, K., Min, S.P., Ji-Won. Y., 2013. Methods of downstream processing for the production of biodiesel from microalgae. *Biotechnology advances* 31, 862-876.
- Lim, C.Y., Gursong, Y., Chen, C.L., Wang, J.Y., 2013. A strategy for urban outdoor production of high-concentration algal biomass for green biorefining. *Bioresource technology* 135, 175-181.
- Pienkos, P.T. and Darzins, A., 2009. The promise and challenges of microalgal-derived biofuels. *Biofuels Bioprod. Bioref.* 3, 431–440.
- Ramesh, D., 2013. Lipid Identification and Extraction Techniques. *Biotechnological Applications of microalgae (pp.89-98)*.University of california: San Diego.
- Schlesinger, A., Eisenstadt, D., Bar-Gil, A., Carmely, H., Einbinder, S., Gressel, J., 2012. Inexpensive non-toxic flocculation of microalgae contradicts theories; overcoming a major hurdle to bulk algal production. *Biotechnol. Adv.* 30, 1023–1030.
- Vandamme, D., Foubert, I., Muylaert, K., 2012. Flocculation as a low cost method for harvesting microalgae for bulk biomass production. *Trends in biotechnology* 31, 233-239.