

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

**“ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE
MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIOREACTORES A
ESCALA PILOTO”**

Realizado por:

RUBEN DARIO GRIJALVA GONZALEZ

Director del proyecto:

Ing. Magister Rodolfo Jefferson Rubio Aguiar

Como requisito para la obtención del título de:

INGENIERO QUÍMICO INDUSTRIAL

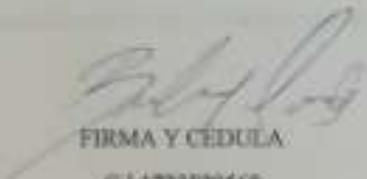
**ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE
MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIOREACTORES A
ESCALA PILOTO**

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

DECLARACION JURAMENTADA

Yo, RUBÉN DÁRIDO GRUJALVA GONZALEZ, con cédula de identidad # 1723829568, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.


FIRMA Y CEDULA

C.I.1723829568

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

"ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO"

Realizado por:

RUBÉN DÁRIO GRUJALVA GONZALEZ

Como Requisito para la Obtención del Título de:

INGENIERO QUIMICO INDUSTRIAL

ha sido dirigido por el profesor

JEFFERSON RUBIO AGUIAR

quien considera que constituye un trabajo original de su autor


FIRMA

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

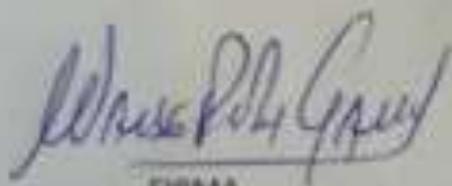
PABLO CASTILLEJO

WALBERTO GALLEGOS

Después de revisar el trabajo presentado,

lo han calificado como apto para su defensa oral ante

el tribunal examinador



FIRMA



FIRMA

**ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE
MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIOREACTORES A
ESCALA PILOTO**

DEDICATORIA

A mi familia por todo el apoyo incondicional que me han brindado y quienes han sido una parte fundamental en todo este camino.

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIOREACTORES A ESCALA PILOTO

AGRADECIMIENTO

A mi familia por todo el amor y esfuerzo.

A mis maestros por impartirme los conocimientos necesarios para poder culminar con éxito esta etapa de mi vida

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIOREACTORES A ESCALA PILOTO

RESUMEN

Las microalgas son organismos unicelulares ricos en lípidos, característica fundamental para la obtención de biodiesel. Una especie prometedora es *Chlorella sp*, ya que puede llegar a tener hasta 40 % de lípidos. El trabajo de investigación tiene como objetivo desarrollar un estudio económico de la producción de biomasa obtenida del crecimiento de *Chlorella sp* en fotobiorreactores a nivel de planta piloto (escalado industrial). Con la finalidad de llegar a tener mayor crecimiento celular posible; dentro de los fotobiorreactores se controló el pH, los nutrientes (medio de cultivo) y la temperatura. Para el estudio económico se analizó los costos variables por kilogramo de biomasa producida, obteniendo el precio unitario de producción y la productividad de la planta piloto. Dando como resultado un valor de 6,76 centavos de USD por gramo producido de microalga.

PALABRAS CLAVES: Microalgas, Fotobiorreactor, Biocombustible, Biomasa, Producción

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIOREACTORES A ESCALA PILOTO

ABSTRACT

Microalgae are unicellular organisms rich in lipids, a fundamental characteristic for obtaining biodiesel. A promising species is *Chlorella sp*, which can reach up to 40% lipids. The objective of the research work is to develop an economic study of the biomass production obtained from the growth of *Chlorella sp* in photobioreactors at the pilot plant level. In order to reach the mayor, you can get the best results in health care. For the economic study, the variable costs per kilogram of biomass produced were analyzed and, obtaining the unit price of production, and the productivity of the pilot plant. Giving a value of 6.76 cents USD per gram produced from microalgae.

KEYWORDS: Microalgae, Photobioreactor, Biofuel, Biomass, Production

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

INTRODUCCIÓN

Actualmente existen dos grandes problemas a nivel energético que son: el primero el agotamiento de las reservas de petróleo y el segundo la contaminación que genera la quema de combustibles fósiles. Con el inicio de la revolución industrial en los siglos XVIII y XIX se comienza a observar cambios en el aire debido a los gases emitidos por los procesos productivos; pero todo esto, no tuvo importancia sino hasta comienzos del siglo XX cuando a políticos y científicos les interesó el bienestar de la humanidad y de los diferentes ecosistemas (Millán-Oropeza & Badillo-Corona, 2012) .

El crecimiento exponencial de la población, así como de las necesidades alimentarias y energéticas, han impulsado a la sobreexplotación de la naturaleza produciendo una degeneración progresiva de los ecosistemas que nos rodean. La incógnita planteada por muchos es ¿Cuánto tiempo nos queda? Según muchos investigadores del ciclo del petróleo, que es la principal fuente de energía de la sociedad actual, se agotará en los próximos cuarenta años (Estrada, Noguera, & Lopez, 2010).

Todo esto conlleva a que hoy en día sea innegable la existencia del cambio climático, y este peligro que está sintiendo el plantea genera, que sea parte de la agenda de toda cumbre internacional ambiental. Cambio climático envuelve: sequías, inundaciones y acidificación de los océanos a nivel local y global, siendo la actividad humana la principal responsable, en especial, la quema de combustibles fósiles, impulsora del 80% de producción de energía (Hernández-Pérez & Labbé, 2014).

El planeta cuenta con un sinnúmero de recursos renovables que pueden ser aprovechados por el hombre, entre los que se destacan energías: eólica, solar, hidráulicas, mareomotriz y las bioenergías. Estas últimas son tecnologías que se

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIOREACTORES A ESCALA PILOTO

aprovechan de forma directa o indirecta de la biomasa vegetal, lo que principalmente consiste en capturar energía del sol mediante fotosíntesis y almacenarla químicamente en tejidos vegetales (Neumann & Jeison, 2015).

En el Ecuador, el uso de la energía ha sido esencial para el desarrollo social y económico, entre sus usos y servicios básicos se encuentran: cocción, iluminación, calefacción, enfriamiento y transporte (Izurieta, Corral, & Guayanlema, 2013).

El transporte ha constituido uno de los principales participantes en el desarrollo económico y social de las diferentes poblaciones; éste está ligado al consumo de combustibles fósiles, principalmente el transporte terrestre. El uso de los combustibles derivados del petróleo, tiene consecuencias no favorables como, la contaminación del aire y a largo plazo el cambio climático. Ante ello se identificó la importancia de obtener energía a partir de biocombustibles, donde se pueden alcanzar mejoras y optimizaciones en lo que se refiere a la obtención de energía más limpia, que ayudarán a generar desarrollo sostenible del país (Izurieta et al., 2013).

Biocombustibles

En las distintas cumbres internacionales de ambiente uno de los puntos a tratar ha sido el convencer a Estados Unidos y a la Unión Europea que sean conscientes con su “adicción al petróleo” para cambiar el hábito de su uso, con la inyección de biocombustibles a sus procesos productivos. El biodiesel y bioetanol conocidos como “neutros en emisión de carbón” quiere decir que las emisiones de CO₂ que se producen en su combustión, al proceder de un carbono retirado de la atmósfera en el mismo ciclo biológico, no alteran el equilibrio de la concentración de carbono atmosférico, y por tanto no incrementan el efecto invernadero. Su uso contribuye a reducir las emisiones de

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

CO₂ a la atmósfera siempre que sustituya a un combustible fósil (Bravo, Red, & Las, 2006).

Existen propuestas principalmente de Estados Unidos de sustituir en 20 % el consumo de energía tradicional por la implementación de combustibles de segunda y tercera generación, con el fin de comenzar el cambio hacia el consumo de las energías “verdes”. Sin embargo, esto ha dado lugar a una competencia entre la utilización de materias primas en la producción de alimentos, frente a la utilización de ellas en la producción de biocombustibles, ya que éstos se pueden generar de los propios alimentos como el maíz, la caña de azúcar, soya entre otros con el consiguiente incremento de precios de estos alimentos básicos (Salinas & Gascar, 2009).

Se entiende por biocombustibles los que se obtienen de cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato en el proceso biológico de organismos recientemente vivos, como plantas, o sus desechos metabólicos (estiércol). Se ha aceptado este término para denominar al grupo de productos energéticos y materias primas de tipo renovable que se originan a partir de la materia prima orgánica formada por vía biológica, quedando por fuera de este concepto los combustibles fósiles, aunque también tuvieron su origen biológico en épocas remotas (Estrada et al., 2010).

Hoy en día se pueden diferenciar distintos tipos de biomasa; es así que tenemos:

Biomasa primaria: Es la materia orgánica formada directamente de los seres fotosintéticos. Este grupo comprende la biomasa vegetal, incluidos los residuos agrícolas y forestales (Salinas & Gascar, 2009).

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIOREACTORES A ESCALA PILOTO

Biomasa secundaria: Es la producida por los seres heterótrofos que utilizan en su nutrición la biomasa primaria. La constituyen la materia fecal o la carne de los animales (Salinas & Gascar, 2009).

Biomasa terciaria: Es la producida por los seres que se alimentan de biomasa secundaria, por ejemplo los restos y deyecciones de los animales carnívoros que se alimentan de herbívoros (Salinas & Gascar, 2009).

Biomasa natural: Es la que producen los ecosistemas silvestres; 40% de la biomasa que se produce en el planeta tierra proviene de los océanos (Salinas & Gascar, 2009).

Biomasa residual: La que se puede extraer de los residuos agrícolas y forestales, y de las actividades humanas (Salinas & Gascar, 2009).

Cultivo energéticos: Recibe esta denominación cualquier cultivo agrícola cuya finalidad sea suministrar la biomasa para producir biocombustibles (Salinas & Gascar, 2009).

Biocombustibles son aquellos biocarburantes como alcoholes, éteres, ésteres y otros productos químicos que provienen de compuestos orgánicos de base celulósica (biomasa) extraída de plantas silvestres o de cultivos, que permite la sustitución del uso de la gasolina o diésel (fósiles) utilizados en vehículos para transporte o máquinas destinadas para producir energía (Salinas & Gascar, 2009).

En tal sentido, los biocombustibles surgen como una fuente de energía alternativa que puede usarse en caso de que los hidrocarburos (fósiles) se agoten. En un segundo propósito su uso contribuye a frenar el calentamiento global, ayudando a reducir las emisiones de CO₂ (Salinas & Gascar, 2009).

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIOREACTORES A ESCALA PILOTO

Los biocombustibles de segunda generación se distinguen de los de primera generación en dos aspectos: se obtienen de vegetales que no tienen una función alimentaria, y se producen con innovaciones tecnológicas que permitirán ser más ecológicos y avanzados que los actuales (Ponce, 2010).

En este contexto, el uso de microalgas para la producción de biodiesel se estudia como una opción promisoriosa, ya que presentan mayor eficiencia fotosintética, son más eficaces en la asimilación de CO_2 y otros nutrientes con respecto a las plantas, acumulan hasta el 20% de triglicéridos, no están adheridas a tierras cultivables y demandan menor consumo de agua dulce debido a que pueden cultivarse en agua salobre (Millán-Oropeza & Badillo-Corona, 2012).

Las microalgas son fábricas celulares llevadas por la luz solar, que convierten dióxido de carbono en biocombustibles potenciales, compuestos bioactivos de alto valor. Estas algas comprenden un vasto grupo de organismos fotosintéticos, heterótrofos, los cuales tienen un excelente potencial como cultivos energéticos (Ponce, 2010).

Microalgas

Las microalgas son organismos unicelulares microscópicos (2-200 μm), polifiléticos, su metabolismo puede ser autótrofo o heterótrofo y suelen ser eucariontes, aunque las cianobacterias procariontes son frecuentemente incluidas como microalgas (Hernández-Pérez & Labbé, 2014).

Las microalgas pertenecen al reino vegetal y se las ha clasificado como talofitas, plantas inferiores, por presentar una estructura simple no vascularizada con ausencia de raíz, tallo y hojas; sus estructuras reproductivas desprovistas de semillas y

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

flores. Pueden ser procarióticas o eucarióticas, pluricelulares o unicelulares, sin embargo tienen una característica parecida a las plantas superiores como es la existencia de clorofila (Suarez et al., 2011).

Las algas se encuentran distribuidas en grandes zonas geográficas, pudiendo ser encontradas en todas las condiciones ambientales de la Tierra, desde suelos fértiles a desérticos; sin embargo, son, en los ambientes acuáticos que se encuentra mayor prevalencia de las microalgas (Suarez et al., 2011) .

Uno de los papeles fundamentales de estos microorganismos está en el hecho de ser los productores primarios de la cadena trófica, constituyéndose así en los formadores de materia orgánica. Tomando en cuenta la diversidad de cepas que existen, su tamaño puede oscilar en rangos de 5 a 50 μm aproximadamente y son los organismos de crecimientos más rápido en la tierra, desarrollándose así en ambientes con pH y temperatura variables (Subia, 2017).

Biodiesel de microalgas

La Transesterificación es un proceso utilizado para reducir la viscosidad de los triglicéridos; mejora sus propiedades físico-químicas permitiendo su uso como combustible en motores del ciclo diésel sin necesidad de ser adaptado. Durante esta reacción, que es reversible, se debe utilizar gran cantidad de alcohol, el mismo que es recuperado al final de la reacción. (Obando, 2011).

El uso del biodiesel, constituye una alternativa atractiva para satisfacer las necesidades de consumo de la energía de combustibles destilados de petróleo, destinados al transporte y energía térmica (Obando, 2011).

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

El biodiesel es un biocombustible, derivado de aceites de plantas oleaginosas; así como también se puede obtener a través de la cosecha de microalgas, ya que éstas tienen gran cantidad de ácidos grasos, utilizan la radiación solar y el CO₂ atmosférico como fuente de carbón (Millán-Oropeza & Badillo-Corona, 2012). Para la obtención de ácidos grasos se realizan varios procesos, el proceso más utilizado es la extracción por solventes (Alvear, Castillo, Henao, Marimón, & Tejeda, n.d.).

Con lo expuesto, y considerando que la obtención de energía a través de microalgas, es una buena alternativa para recuperar el ambiente sin la quema de combustibles fósiles, la presente investigación tiene, como objetivo principal determinar los costos variables de producción para la obtención de biodiesel, que permita la generación de energía más limpia.

El presente estudio económico permitirá ser un medio de consulta para que las micro y pequeñas empresas, puedan conocer costos de producción de este tipo de energía de una manera técnica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de la cepa

La cepa fue obtenida del cepario del laboratorio DISERLAB, ubicado en el sector de Nayón en la ciudad de Quito, el cual está acreditado por el Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE) de acuerdo con los requerimientos establecidos en la Norma NTE INEN ISO/IEC 17025:2006 “Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración”.

Se trabajó con 500 ml a una concentración de 5×10^6 células / ml, la mantención de la cepa se la realizó en el laboratorio de la Universidad Internacional SEK bajo

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

condiciones controladas de aire filtrado, temperatura, medio esterilizado y revisando periódicamente que no posea contaminación.

Medio de cultivo

Se realizaron pruebas con dos medios de cultivo, y se utilizó fertilizantes de tipo foliar NPK con diferentes concentraciones de macronutrientes y micronutrientes para escoger cuál es el más conveniente para un crecimiento aceptable; para proceder a usarlo en el fotobiorreactor de 200 litros (Silva-Benavides, 2016) .

- Bayfolan Bayer es un abono foliar líquido, que ahorra trabajo y aporta los principios nutritivos necesarios para la alimentación de las plantas.

Posee la siguiente composición química.

Bayfolan Bayer	
Nitrógeno Amoniacal (N)	5,3 %
Nitrógeno Nítrico (N)	3,7 %
Nitrógeno Total (N)	9 %
Fosforo Total asimilable (P)	9 %
Potasio soluble en agua (K)	7 %
Hierro (Fe)	0,19 g/L
Cobre (Cu)	0,081 g/L
Molibdeno (Mo)	0,01 g/L
Zinc (Zn)	0,08 g/L
Boro (B)	0,101 g/L
Cobalto (Co)	0,004 g/L
Manganeso (Mn)	0,18 g/L

Tabla 1 Nutrientes del medio Bayfolan

Además incluye en su estructura hormonas de crecimiento y vitamina B1.

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

Para la preparación de este medio de cultivo en 180 litros, se adicionó 1,5mL de nutriente agrícola por cada litro de agua utilizada, siendo un total de 270 ml del producto Bayfolan (Aguilar et al., 2011).

- Vitalfol Ecuaquímica es un abono creado para cultivos y árboles frutales de floraciones sucesivas, ya que estimula el crecimiento tiene la siguiente composición.

Vitalfol Ecuaquímica		
Nitrógeno (N)	10	%
Fosforo (P)	40	%
Potasio (K)	10	%
Azufre (S)	1	%
Boro (B)	0,2	%
Cobre (Cu)	0,2	%

Tabla 2 Nutrientes del medio Vitalfol

Para la preparación del medio se colocó 5 ml por cada litro de la solución madre de vitalfol compuesta de 4 gr/ 1 litro de agua a utilizar en el fotobiorreactor.

Condiciones del cultivo

- *Esterilización química*

Es un proceso mediante el cual el agua contenida en el fotobiorreactor es depurada, para este proceso se introdujo una solución de hipoclorito de sodio al 5% (0,14 ml de la solución por litro del fotobiorreactor), se dejó aireando con el burbujeo del fotobiorreactor prendido por un periodo 24 horas, después se elimina el cloro residual con una solución de tiosulfato de sodio al 24,81% (0,1 ml de la solución por cada litro del fotobiorreactor) se esperó una por hora antes de comenzar el proceso de cultivo.

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

- ***Cultivo Inicial***

En el fotobiorreactor se colocó 250 mililitros de una solución concentrada de microalga *Chlorella sp* obtenido del laboratorio DISER LAB, llegando a mediciones de densidad óptica de 0,017 abs (Absorbancia) con una longitud de onda de 675.

- ***Fotobiorreactor***

Se diseñó y construyó el fotobiorreactor, tomando como base el reactor antes construido, de capacidad de 60 litros y que se encuentra en la planta piloto de la Universidad Internacional SEK, se realizó con placas planas de vidrio, utilizando el espesor de vidrio seis milímetros, que permite mantener la presión generada por el agua; las placas son transparentes y lisas; se realizó el estudio dimensional para poder mantener un volumen aproximado de 200 litros.

Las dimensiones del fotobiorreactor son de 17 cm de ancho, 60 cm de altura y 2 metros de largo. Con un diámetro de burbuja para proporcionar CO₂ y mantener suspendido las microalgas de aproximado de 0,00673 metros (Coral, 2017).

Para determinar la evolución de la densidad celular en el fotobiorreactor se utilizó el modelo exponencial $N = N_0 * 2^n$ para la microalga *Chlorella sp*.

- ***Iluminación***

En un fotobiorreactor abierto como el que posee la planta piloto, la fuente de luz más importante es el sol, este factor es determinante en los procesos de fotosíntesis de las microalgas. La fuente de luz puede ser artificial y esta favorece, debido a que la luz solar contiene rayos ultravioleta que pueden ser nocivos para las microalgas (Ramírez Mérida, Queiroz Zepka, & Jacob-Lopes, 2013).

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

La radiación solar medida en Watts sobre metro cuadrado que capto en el fotobiorreactor de la planta piloto, se la midió mediante la estación meteorológica de la Universidad Internacional SEK, para este proceso se tomó los datos diariamente por el periodo de crecimiento algal en la planta piloto.

- ***Aireación***

Se utilizó un compresor de 2 Hp de potencia, junto con juego de mangueras para generar la agitación correcta al fotobiorreactor.

El diámetro de burbuja con el que el reactor opera es de 0,00673m el cual se calculó a una temperatura de 30°C y 0,76 atm presión atmosférica de la ciudad de Quito (Coral, 2017).

- ***Temperatura***

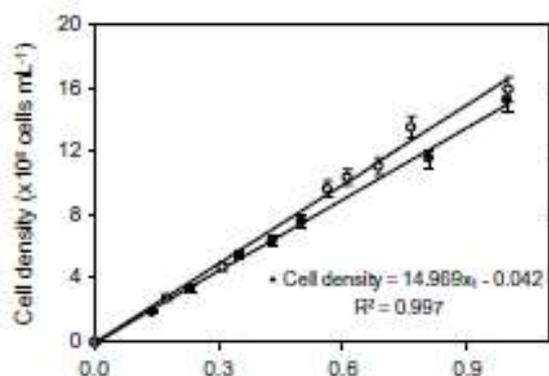
El control de temperatura se realizó mediante una resistencia de 2000 W con el fin de mantener un rango estable durante todo el ciclo del fotobiorreactor en 28 °C con variación de ± 1 °C, el proceso tiene un control de temperatura de tipo PID (proporcional, integral y derivativo), el cual está compuesto del cerebro y la termocupla, los cuales regulan el paso de energía y la temperatura del reactor respectivamente.

Determinación de la concentración celular por densidad óptica

La determinación por densidad óptica de microalgas, puede ser menos precisa que el conteo celular en el microscopio, pero es una manera más rápida de evaluar la concentración celular.

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

Para poder utilizar este tipo de método es fundamental poseer las curvas de correlación lineal entre la concentración celular obtenida mediante conteo directo junto con la absorbancia (Arredondo, 2007).



Fuente:(Chiu et al., 2008)

Figura 1 Correlación absorbancia versus concentración celular

Muchos autores proponen que para la determinación de longitud de onda se tome la más cercana al pico de clorofila siendo la de 675nm, lo cual evita que a concentraciones bajas de microalgas se permita realizar la lectura con el mínimo de errores, por lo tanto se usó ese valor para medir la concentración de *Chlorella sp* en la medición de la concentración celular (Arredondo, 2007).

Obtención de biomasa

Cuando se determinó el fin del periodo de crecimiento de la microalga, que es el comienzo de la fase estacionaria de la microalga en el fotobiorreactor mediante absorción de luz visible, se procedió a cosechar la microalga utilizando el método de floculación y decantación utilizando el equipo de prueba de jarras, este método es de los más baratos para la separación.

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

El proceso de concentración de biomasa se la realizó en el mismo fotobiorreactor de 200 litros, utilizando el floculante orgánico (LIPESA 1544), el cual es el más efectivo después de una selección con otros floculantes para floculación de la microalgas (ECHEERRIA, 2017).

Se realizó la pruebas de jarras para determinar la concentración efectiva para generar la separación de las fases agua microalga dando esta como resultado 22 ppm de concentración del floculante la cual es efectiva aplicar en este fotobioreactor , para esta siembra de algas (ECHEERRIA, 2017).

Productividad de la biomasa seca

Para obtener la cantidad de biomasa seca en gramos por cada litro de cultivo se, secó en la estufa una muestra inicial y a una final del fotobiorreactor durante 24 horas a 105 °C (siguiendo el Standar Methods para obtención de solidos suspendidos) dando su diferencial de pesos la cantidad de biomasa producida en la planta piloto en el periodo de producción (Coral, 2017).

Ruptura celular

Existen varias metodologías para la ruptura celular de microalgas , entre las más empleadas están la deshidratación por liofilización, congelamiento, reducción de tamaño de partícula, ondas de ultra-sonido y homogenización en alta presión; se basó el estudio en el proceso de ruptura celular mediante ultra sonido (Oliveira-leite & Reis-, 2013).

Para determinar el porcentaje de ruptura celular, se utilizó el contaje celular mediante la Cámara de Neubauer, realizando un contaje inicial y un contaje al final del proceso; dando su diferencia la cantidad de células destruidas por el ultra sonido.

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIOREACTORES A ESCALA PILOTO

- ***Conteo Celular mediante Cámara de Neubauer***

Es necesario homogenizar la muestra antes de realizarse el conteo celular, debido a que el conteo no era inmediato y las células se sedimentaban, una vez homogénea la muestra, se toma una muestra de 20 ul y se colocó en la cámara de Neubauer. Después se fijaba el microscopio utilizando el lente de 40 aumentos para proceder a contar las células en cinco cuadrantes, cuando el número de células por mililitro excedía el número posible de conteo se realizaban diluciones para que el contaje fuera correcto (Coral, 2017).

$$\text{concentracion celular} = \frac{\text{numero de celulas} * 10000}{\text{numero de cuadrantes}}$$

Fuente: (Coral, 2017)

Ecuación 1 Cámara de Neubauer

- ***Ultrasonido***

Para realizar los ensayos se utilizó 100 mL de la muestra líquida la cual fue colocada en el sistema de sonicación SONICS VIBRAR CELL por aproximadamente 30 minutos. Los ciclos de trabajo fueron de 5s para sonicación y de 2s de pulsado, con amplitud del 40 % y frecuencia de 20 kHz (Oliveira-leite & Reis-, 2013).

Análisis de los costos de producción

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

- *Costeo Variable de insumos*

Con este método se consideran costos del producto, los costos variables de producción tanto directa como indirecta. Solamente los costos variables de producción se cargan a los inventarios de la producción y constituyen el costo de los productos terminados. Los costos fijos de producción no se capitalizan en los inventarios, sino que se consideran gastos del período en el cual se incurren y como tal se registran en el estado de resultados (Atehortúa, 2008).

Para realizar este costeo se realizó un estudio de los precios de insumos en el mercado, y que cantidad de cada uno de los compuestos se necesita para cada corrida del fotobiorreactor, y se obtuvieron los costos de cada uno de los insumos aplicando la siguiente fórmula:

$$CV = C * Q$$

Ecuación 2 Costos Variables

CV	Costo Variable
C	Costos de insumos
Q	Cantidad que se utilizó de insumo

Tabla 3 Costos Variables

Esta forma de obtención de los costos de los insumos de producción se lo realizó para los siguientes procesos: esterilización química, formación de medio de cultivo y el proceso floculación.

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

- *Coste variable de Energía*

Para el proceso de análisis de costos de energía eléctrica, fijamos la atención en los dos equipos consumidores de energía de la planta piloto (tabla 14), tomando en cuenta que los dos equipos poseen controladores de tipo PID y ON/OFF, lo que permite que el equipo no permanezca todo el tiempo trabajando y suministre la energía necesaria para el proceso; los equipos demandantes de energía eléctrica que pertenecen a la planta piloto son:

Equipo	Controlado
Compresor 2 HP	Tipo ON/OFF
Resistencia de niquelina de 2000w	Tipo PID (proporcional, integral y derivativo)

Tabla 4 Equipos energéticos de la planta piloto

El potencial eléctrico que posee un equipo está dado por la multiplicación de la intensidad que posee una corriente por la diferencia de potencial.

Si esta intensidad de corriente es expresada en amperios (C/s) y la diferencia de potencial en voltios (J/C), la resultante es la potencia que es expresada en J/s o W (Vega & Ramirez, 2014).

$$P(W) = I * V$$

Ecuación 3 Potencia Eléctrica

Para poder costear la energía eléctrica es necesaria obtener los kWh que es el nivel de consumo eléctrico, para esta medición es necesario obtener el tiempo de encendido de los equipos de consumo eléctrico (Vega & Ramirez, 2014).

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

$$kWh = P (kW) * t(h)$$

Ecuación 3 Consumo Eléctrico

El costo del kilovatio-hora en el Ecuador varía dependiendo de la hora de consumo como del sector productivo a donde está dirigida la energía; tomando en cuenta que esta investigación busca un escalamiento industrial, Se utiliza el costo del kilovatio hora industrial. El costo referencial de la energía eléctrica para el sector industrial en el Ecuador es de 8,1 centavos el kWh (Camara de Comercio de Guayaquil, 2018).

Es necesario obtener datos de tiempo y potencia para costear la cantidad de energía de la planta, en este proceso se utilizó un cronómetro en la medición de los tiempos de encendido de los equipos, mientras que para obtener los datos de amperaje y voltaje se utilizó un multímetro de gancho de marca TRUPPER.

Resultados

Comparación entre medios de cultivo

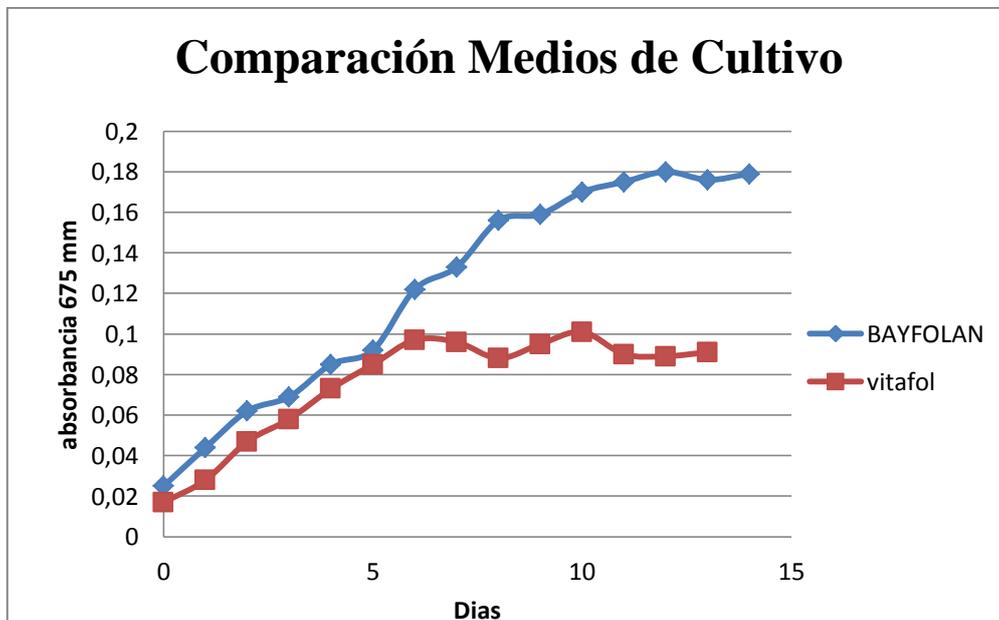


Figura 2 Comparación de crecimiento de medios de cultivo

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

En la figura número 2 se identifica la diferencia de crecimientos de la microalga *Chlorella sp* con diferentes medios de cultivo, roja para Vitafol y azul para Bayfolan, identificándose mejor crecimiento en el medio formado por Bayfolan.

Radiación solar promedio en el periodo de crecimiento

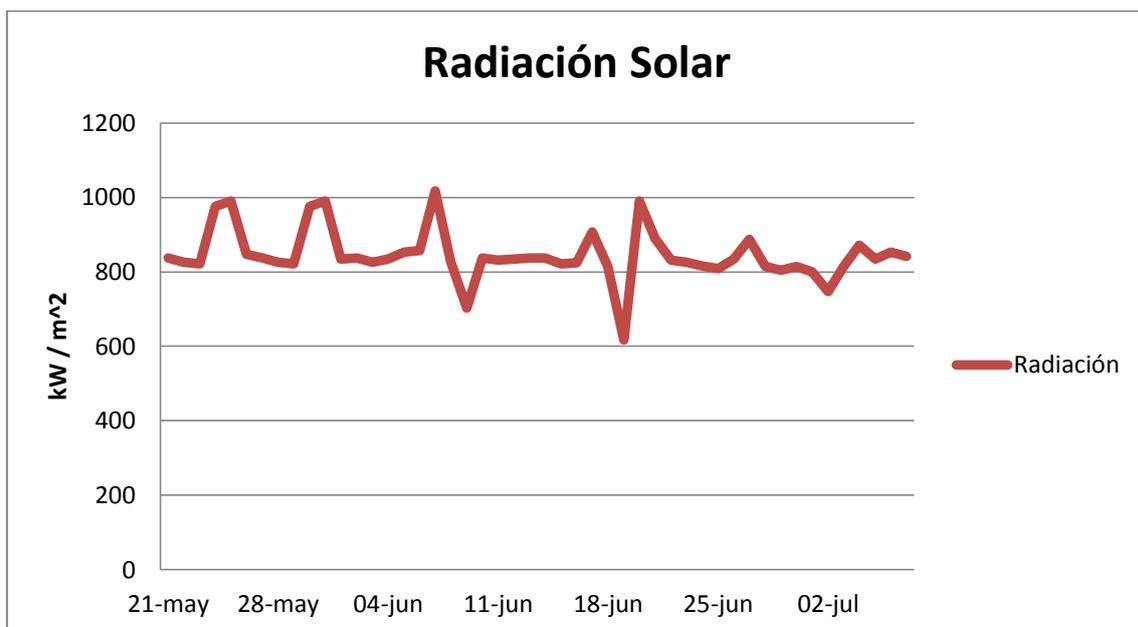


Figura 3 Radiación solar periodo de crecimiento

La figura número 3 expresa las medias de radiación solar diaria en la época de crecimiento celular de los tres batch en el periodo de 12 horas de luz, tomado este dato de la estación meteorológica de la Universidad Internacional SEK teniendo valor promedio de 845,48 KW/ m2.

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

Cinética de Crecimiento de *Chlorella sp* en fotobiorreactores de 200 litros

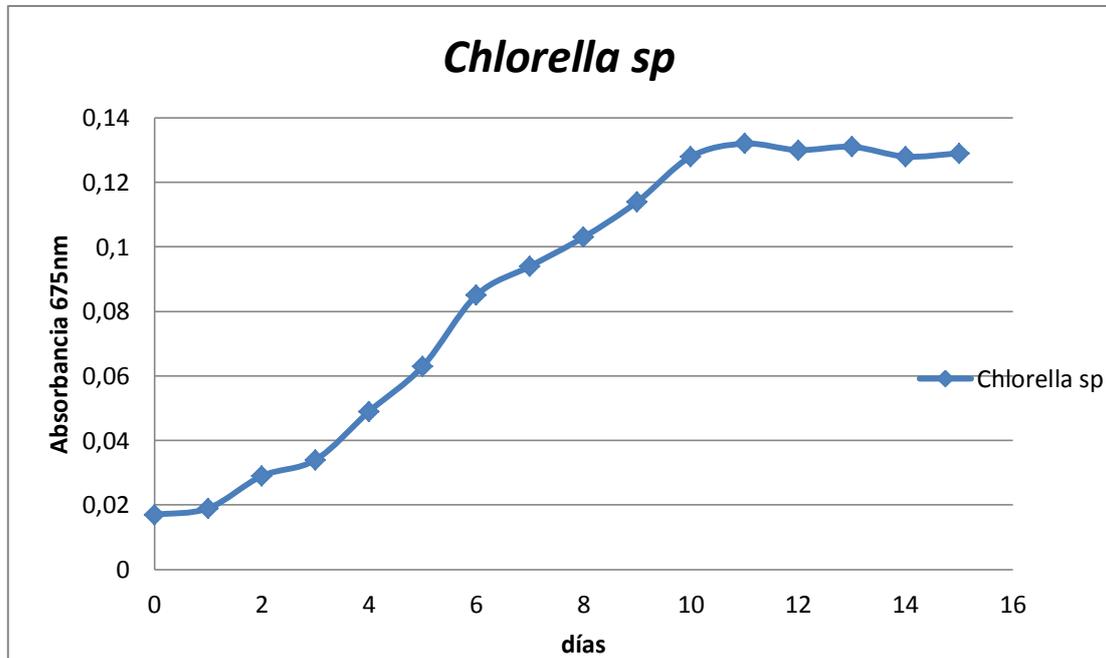


Figura 4 Corrida 1. Crecimiento periodo 21 de Mayo al 4 de Junio

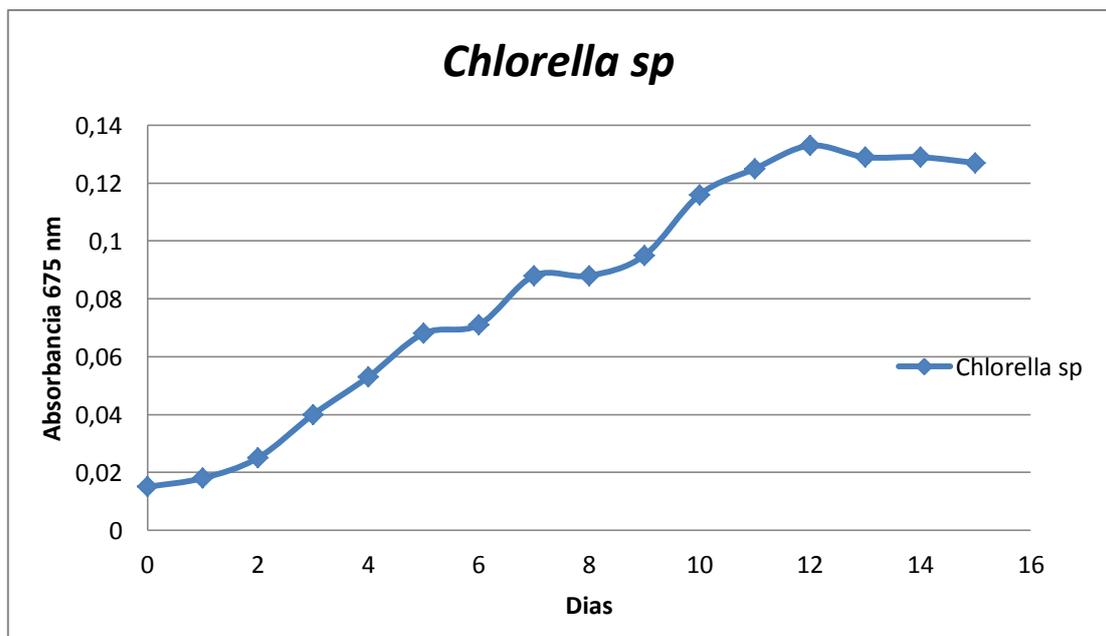


Figura 5 Corrida 2. Crecimiento periodo 8 de Junio al 22 de Junio

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

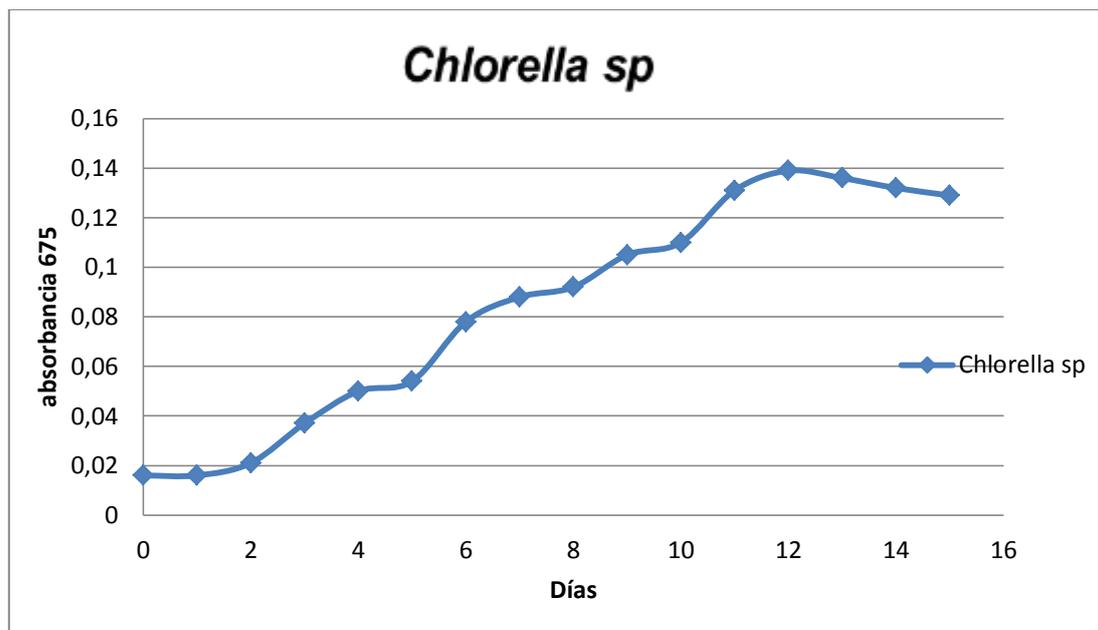


Figura 6 Corrida 3. Crecimiento periodo 25 de Junio al 9 de Junio

En las figuras 4, 5, 6 se puede observar el crecimiento de la microalga *Chlorella sp* durante 15 días, teniendo comportamiento similar en cada una de las corridas y dando como día final de crecimiento alrededor del onceavo y doceavo día .

Productividad de biomasa seca

Productividad de biomasa Primer Batch	
Inicial	0,05 g/L
Final	0,98 g/L
Total	0,93 g/L
Producción diaria de biomasa seca	0,0775 g/l*d

Tabla 5 Corrida 1. Productividad de la biomasa seca *Chlorella sp*

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

Productividad de biomasa Segundo Batch	
Inicial	0,048 g/L
Final	1,001 g/L
Total	0,953 g/L
Producción diaria de biomasa seca	0,079 g/l*d

Tabla 6 Corrida 2. Productividad de la biomasa seca *Chlorella sp*

Productividad de biomasa Tercer Batch	
Inicial	0,051 g/L
Final	1,013 g/L
Total	0,962 g/L
Producción diaria de biomasa seca	0,080 g/l*d

Tabla 7 Corrida 3. Productividad de la biomasa seca *Chlorella sp*

Análisis Estadístico	
Media	0,948 g/l
Mediana	0,953 g/l
Desviación estándar	0,0165

Tabla 8 Análisis estadístico descriptivo

En la tabla número 5, 6, 7 indican la productividad en g/L de cada uno de las corridas y la producción diaria de biomasa seca que se obtuvieron. En la tabla numero 8 representa el análisis estadístico descriptivo de los datos de producción de biomasa que se obtuvieron, dando la media que es el valor promedio de las corridas siendo 0,948 g/L

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

y una desviación estándar que en la representación de cuanto se alejan los datos de la media de 0,01650.

Costeo variable de insumos

A continuación se realizara el costeo para los insumos Bayfolan, Hipoclorito de sodio al 5%, tiosulfato de sodio al 24,81% y floculante (Lipesa 1544).

Medio de cultivo Bayfolan		
Pecio de venta al publico	4,5	USD/500 ml
Utilización	1,5	ml/ L
En el Batch	270	ml/batch
Costo del ml	0,009	USD/ml
Costo Batch	2,43	USD/batch
Costo por gramo producido corrida 1	1,452	USD/gramo
Costo por gramo producido corrida 2	1,416	USD/gramo
Costo por gramo producido corrida 3	1,403	USD/gramo

Tabla 9 Costeo del medio de cultivo

Hipoclorito de sodio 5%		
Pecio de venta al publico	3	USD/5000 ml
Utilización	0,14	ml/ L
En el Batch	25,2	ml/batch
Costo del ml	0,0006	USD/ml
Costo Batch	0,0151	USD/batch
Costo por gramo producido corrida 1	0,009	centavos /gramo
Costo por gramo producido corrida 3	0,0088	centavos/gramo
Costo por gramo producido corrida 3	0,0087	centavos/gramo

Tabla 10 Costeo del hipoclorito de sodio, proceso de esterilización química

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIOREACTORES A ESCALA PILOTO

Tiosulfato de sodio		
Pecio de venta al publico	100	USD/25kg
Utilización	0,02	g/ L
En el Batch	4,46	gr/batch
Costo del ml	0,004	USD/gr
Costo Batch	0,017	USD/batch
Costo por gramo producido corrida 1	0,010	centavos /gramo
Costo por gramo producido corrida 2	0,010	centavos/gramo
Costo por gramo producido corrida 3	0,010	centavos/gramo

Tabla 11 Costeo del Tiosulfato de sodio, proceso de esterilización química

Floculante lipesa 1544		
Pecio de venta al publico	4	USD/kg
Utilización	0,022	g/ L
En el Batch	3,96	gr/batch
Costo del ml	0,004	USD/gr
Costo Batch	0,015	USD/batch
Costo por gramo producido corrida 1	0,009	centavos /gramo
Costo por gramo producido corrida 2	0,0092	centavos/gramo
Costo por gramo producido corrida 3	0,0091	centavos/gramo

Tabla 12 Costeo del floculante (Lipesa 1544), proceso de clarificación

En las tablas 9, 10, 11 y 12 se presenta, el costeo de cada uno de los insumos que se utilizó en los procesos de esterilización, crecimiento y floculación necesarios para la producción de biomasa de microalgas en fotobiorreactores.

Costo Energético de la planta

A continuación se presentara el análisis de costo energético de la planta piloto en la cual se tomara en cuenta la resistencia de 2000 W de potencia y el compresor de dos caballos de potencia.

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

Resistencia PID 2000w		
PVP Industrial	8,1	Centavos USD /kWh
Utilización	2,64	kWh/día
En el Batch	31,8	kWh/batch
Costo Batch	2,57	USD/batch
Costo por gramo producido corrida 1	1,54	centavos /gramo
Costo por gramo producido corrida 2	1,50	centavos/gramo
Costo por gramo producido corrida 3	1,49	centavos/gramo

Tabla 13 Costeo de la resistencia de 2000w, proceso de calentamiento

Aire comprimido compresor 2 HP		
PVP Industrial	8,1	Centavos USD /kWh
Utilización	6,67	kWh/día
En el Batch	80,12	kWh/batch
Costo Batch	6,49	USD/batch
Costo por gramo producido corrida 1	3,87	centavos /gramo
Costo por gramo producido corrida 2	3,78	centavos/gramo
Costo por gramo producido corrida 3	3,74	centavos/gramo

Tabla 14 Costeo del compresor de 2 HP, proceso de agitación

En la tablas 13 y 14 se encuentran los costos energéticos de cada uno de los equipos consumidores: compresor de dos caballos y de la resistencia de 2000 W que posee la planta piloto.

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIOREACTORES A ESCALA PILOTO

*Costo variable total de producción de microalga *Chlorella sp**

Costos variables de producción corrida 1		
Procesos	Costo	unidad
Esterilización química	0,019	Centavos USD /gramo
Medio de cultivo	1,451	Centavos USD /gramo
Floculación	0,009	Centavos USD /gramo
Aire comprimido	3,877	Centavos USD /gramo
Calentamiento	1,538	Centavos USD /gramo
Total	6,896	Centavos USD /gramo

Tabla 15 Corrida 1 Costo total en centavos de dólar por gramo de microalga

Costos variables de producción corrida 2		
Procesos	Costo	unidad
Esterilización química	0,0192	Centavos USD /gramo
Medio de cultivo	1,4165	Centavos USD /gramo
Clarificación	0,0092	Centavos USD /gramo
Aire comprimido	3,7836	Centavos USD /gramo
Calentamiento	1,5013	Centavos USD /gramo
Total	6,73	Centavos USD /gramo

Tabla 16 Corrida 2 Costo total en centavos de dólar por gramo de microalga

Costos variables de producción corrida 3		
Procesos	Costo	unidad
Esterilización química	0,019	Centavos USD /gramo
Medio de cultivo	1,40	Centavos USD /gramo
Clarificación	0,0091	Centavos USD /gramo
Aire comprimido	3,748	Centavos USD /gramo
Calentamiento	1,48	Centavos USD /gramo
Total	6,667	Centavos USD /gramo

Tabla 17 Corrida 3 Costo total en centavos de dólar por gramo de microalga

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIOREACTORES A ESCALA PILOTO

Análisis Estadístico Descriptivo		
Media	6,764	Centavos USD/gramo
Mediana	6,73	Centavos USD/gramo
Desviación Estándar	0,1185	

Tabla 18 Análisis Estadístico Descriptivo del costo total

Las tablas 15,16 y 17 presentan los costos variables totales de cada una de las corridas realizadas, involucrando a todos los procesos utilizados en la planta piloto dando como resultado lo expuesto en la tabla 18, siendo el valor de la media de 6,764 centavos de USD /gramo de microalga y obteniendo una desviación estándar de 0,1185 para estos datos.

Ruptura celular

Ruptura Celular			
	Células Inicial cel /ml	Células Final cel /ml	Porcentaje de ruptura
Batch 1	91000000	18000000	80,2 %
Batch 2	94500000	16500000	82,5%
Batch 3	96000000	19500000	79,6 %

Tabla 18 Ruptura celular

La tabla número 18 presenta la efectividad de la ruptura celular por el proceso de ultrasonido obteniendo como valor promedio de disrupción de 80,81 % de células. La presente investigación se realizó experimentalmente hasta la lisis o ruptura celular, pero no se incluyó en los costos por dicha ruptura debía a que no involucraba el alcance de la investigación.

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIOREACTORES A ESCALA PILOTO

Discusión

Esterilización Química

Se utilizó la esterilización química como medida para economizar el proceso de purificación del agua que posee el fotobiorreactor, esta esterilización reemplaza la utilización de agua destilada y auto clavada que se utilizaba a nivel de laboratorio, la cual es muy costoso para llevarlo a un nivel industrial y como se pudo ver en la investigación la esterilización química resulta una buena forma de depuración ya que no se encontró contaminación cruzada con otra especie de microalga o con algún ser patógeno para la microalga, como se encontró en estudios anteriores realizados en el fotobiorreactor de 60 L (Coral, 2017) .

Comparación de Medios de Cultivo

Para disminuir costos, se utilizó fertilizantes foliares en la planta piloto. Estudios han demostrado la eficiencia de fertilizantes foliares como medios nutritivos en cultivos microalgales, cuyos resultados, en términos de productividad de la biomasa, son cercanos o equivalentes con respecto a los medios nutritivos preparados a partir de reactivos químicos convencionales como el BG11 y F/2. Por este motivo se comparó el rendimiento de la dos fertilizantes foliares antes expuestos y a nivel piloto para utilizarlos como medios de cultivo (Silva-Benavides, 2016).

Este proceso se lo realizo en el fotobiorreactor de 60 litros y proporcionando las mismas condiciones de temperatura, PH y cultivo inicial, dando los resultados expuestos en la figura 2.

Como se observa en la figura 2 el medio formado por Vitafol presenta su punto máximo y comienzo del estacionario cercano al 0,100 de absorbancia a 675nm.

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

Mientras que la línea azul que representa al medio Bayfolan llega a su nivel máximo 0,180 de absorbancia a 675 nm.

En estudios anteriores se utilizó reactivos de grado laboratorio para probar en la planta piloto, los costos de la utilización de ese tipo de medios resulto de 65 dólares para el batch, en comparación con el medio de cultivo formado del fertilizante Bayfolan que tuvo un costo aproximado de 2,43 dólares, al utilizar medios de grado analítico se pueden llevar a mayores productividades de microalga pero su relación costo beneficio es menor a la de utilizar un fertilizante foliar (Bayfolan).

Cinética de Crecimiento

Con las Figuras 3,4 y 5 se establece tiempo de crecimiento del alga en los fotobiorreactores debido a su cinética de crecimiento, la cual nos indica que en el periodo de 12 días se llega al máximo de concentración celular que puede tener el proceso con las condiciones externas: medio de cultivo, temperatura e iluminación. La variable limitante que estabiliza el aumento de la densidad celular es la cantidad de luz absorbida por las algas, esto se pudo comprobar debido a que en el laboratorio donde se tiene una cantidad de luz controlada y distribuida, mejora los rendimientos llegando hasta productividades de biomasa de 1,60 g / L según Subía en el 2017.

Floculación

Se llevó a cabo el proceso de floculación para economizar cada uno de los procesos, ya que esta forma de separación física, es uno de los procesos más económicos. Cabe recalcar que en estudios anteriores (Subia, 2017) fue utilizado el proceso de centrifugación lo que sería demasiado costoso para la presente investigación.

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIOREACTORES A ESCALA PILOTO

Se usó un floculante orgánico de la marca LIPESA de nombre 1544, debido a que se probó que este es de los más eficientes, con el fin de encontrar la concentración óptima se realizó una pruebas de jarras con diferentes concentraciones dando como resultado 22 ppm de concentración para el fotobiorreactor; investigaciones previas de este proceso (ECHEERRIA, 2017) les dio un porcentaje de separación del 98,4 % de promedio en las tres corridas a comparación del proceso realizado en este proyecto que dio un valor del 98% .

Energía

En el ámbito económico el costo energético representa el valor más significativo (Vega & Ramirez, 2014) al largo de los procesos, en esta investigación no fue una excepción. Los equipos consumidores de energía en la planta piloto son dos: El compresor de 2HP y la Resistencia de 2000 W. Se realizaron mediciones de voltaje y amperaje por el tiempo de 7 dando como resultado que el costo total energético representa el 78,52 % del proceso de producción, lo cual nos indica en donde debemos reforzar nuevos estudios, con nuevos diseños para disminuir estos costos de producción.

Comparación con otro tipo de Biomasa

Como se indicó en párrafos anteriores, el biocombustible puede ser obtenido a través de otros tipos de biomasa. Con el propósito de realizar una comparación podemos citar al aceite de palma como precursor de biocombustibles; que de acuerdo a CIF de Rotterdam el gramo de esta biomasa es de 5.9 centavos de USD, si hacemos una relación el costo del gramo de la biomasa de microalgas objeto de la presente investigación, es de 6.7 centavos de USD, considerando solo el costo variable de

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIOREACTORES A ESCALA PILOTO

insumos, no se toma en cuenta el costo de la extracción de lípidos. Con esto poder ver que el costo de este proceso es elevado.

Sin embargo, es necesario anotar que el biocombustible obtenido del aceite de palma compite con los productos de consumo alimenticio para el ser humano, siendo por tanto una de las desventajas de la obtención de los biocombustibles a través de este medio.

Conclusiones

- La producción en fotobiorreactores con condiciones ambientales externas permite el crecimiento del *Chlorella sp.*
- La utilización de fertilizantes foliares como medio de cultivo reduce significativamente los costos, en relación a la utilización de los medio formados por compuesto analíticos.
- El medio de cultivo formado por el fertilizante foliar Bayfolan de la marca Bayer tuvo el mejor rendimiento para la producción de *Chlorella sp* en el fotobiorreactor de la planta piloto.
- Para el periodo de cultivo el inóculo inicial es un factor esencial para el comienzo o arranque de la fase exponencial de crecimiento de las microalgas en los fotobiorreactores, siendo este de 12 a 15 días hasta alcanzar la fase estacionaria
- La utilización de densidad óptica a 675nm resultó una forma fácil y efectiva para medición del desarrollo de la concentración celular, debido a la utilización de un monocultivo.

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIOREACTORES A ESCALA PILOTO

- La esterilización química es un método efectivo de depuración del agua, debido a que no se encontró presencia agente patógeno para el crecimiento de la microalga *Chlorella sp* como encontrados en estudios anteriores (Coral, 2017).
- El costo total variable de producción de microalga *Chlorella sp* fue 6,76 centavos cada gramo con una desviación estándar de 0,118; el cual es un valor elevado para poder competir con otros procesos para obtener biocombustible.
- El costo energético obtenido del aire comprimido es el mayor costo variable de producción siendo el 56 % de los costos variables total.

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, C., Chang, I., Tenorio, L., Ynga, G., Oscanoa, A., & Flores, L. (2011). Determinación De La Biomasa Microalgal Potencialmente Acumuladora De Lípidos Para La Obtención De Combustible, 1–20.
- Alvear, M. R., Castillo, C. R., Henao, D. L., Marimón, W., & Tejeda, L. P. (n.d.). Estudio De La Obtención De Biodiesel a Partir De Aceite De Microalgas, (32).
- Arredondo, B. ; V. D. (2007). Concentración recuento celular y tasa de crecimiento. *Métodos y Herramientas Analíticas En La Evaluación de La Biomasa Microalgal*, (January 2007), 17–27.
- Atehortúa, G. P. R. (2008). DE LECHERIA ESPECIALIZADA “ UN ACERCAMIENTO AL ANÁLISIS ECONÓMICO EN GANADERÍA DE LECHE ”: ESTUDIO DE CASO ANALYSIS OF COST FOR A SPECILIZED DAIRY PRODUCTION SYSTEM “ AN APPROACH TO THE DAIRY COW ECONOMIC ANALYSIS “: A CASE STUDY, 37–46.
- Bravo, E., Red, M. H., & Las. (2006). Las nuevas repúblicas del biocombustible. *Network*, (January), 28–30.
- Camara de Comercio de Guayaquil. (2018). Nueva Tarifa Eléctrica 2018 sector industrial y artesanal, 2017–2018.
- Chiu, S. Y., Kao, C. Y., Chen, C. H., Kuan, T. C., Ong, S. C., & Lin, C. S. (2008). Reduction of CO₂ by a high-density culture of *Chlorella* sp. in a semicontinuous photobioreactor. *Bioresource Technology*, 99(9), 3389–3396. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.08.013>

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

- Coral, A. (2017). Diseño, Construcción Y Operación De Un Fotobiorreactor Plano Para La Producción De Biomasa En Condiciones Ambientales a Partir De Microalgas Y Su Uso Posterior En La Industria Energética.
- ECHERRIA, J. (2017). DISEÑO A ESCALA PILOTO DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITES A PARTIR DE MICROALGAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES, 1–74.
- Estrada, C. A., Noguera, Y. C., & Lopez, J. E. (2010). Desarrollo tecnológico prototipo para la producción de biodiesel a partir de microalgas en sistemas cerrados , como biocombustible de segunda generación. *Eighth LACCEI Latin American and ...*, 1–10. Retrieved from http://www.laccei.org/LACCEI2010-Peru/PaymentMissing/ENE017_Estrada.pdf
- Hernández-Pérez, A., & Labbé, J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 49(2), 157–173. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572014000200001>
- Izurieta, F., Corral, A., & Guayanlema, V. (2013). Identificación de las necesidades de eficiencia energética en el transporte. *I Congreso Internacional y Expo Científica*, I, 9. Retrieved from http://www.iner.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/04/ISEREE_Identificación-de-las-necesidades-de-EE-en-transporte.pdf
- Millán-Oropeza, L. C. J. M.-M. A., & Badillo-Corona, A. (2012). Ra Ximhai, 8, 101–115.
- Neumann, P., & Jeison, D. (2015). Contribución energética de la digestión anaerobia al proceso de producción de biodiesel a partir de microalgas. *Ingeniare. Revista*

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIOREACTORES A ESCALA PILOTO

Chilena de Ingeniería, 23(2), 276–284. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052015000200012>

Obando, J. J. J. (2011). Evaluación tecno-económica de la producción de biocombustibles a partir de microalgas. *Tesis Maestría Inedita*, 109.

Oliveira-leite, M., & Reis-, J. S. (2013). Desempeño de dos técnicas de rompimiento celular en la caracterización de ficobiliproteínas en la microalga *scenedesmus sp.* *Revista Tumbaga*, 2(8), 65–79. Retrieved from <http://revistas.ut.edu.co/index.php/tumbaga/article/viewFile/305/341>

Ponce, R. (2010). Las algas : el combustible del futuro. *Gestión de La Calidad Del Agua MEA*, 4.

Ramírez Mérida, L. G., Queiroz Zepka, L., & Jacob-Lopes, E. (2013). Fotobiorreactor: Herramienta para cultivo de cianobacterias. *Ciencia y Tecnología*, 6(2), 9–19. <https://doi.org/ISSN 1390-4043>

Salinas, E., & Gascar, V. (2009). IOS BIOCOMBUSTIBLES, 75–82. <https://doi.org/10.4067/S0718-09502009000100006>

Silva-Benavides, A. M. (2016). Evaluación de fertilizantes agrícolas en la productividad de la microalga *Chlorella sorokiniana*. *Mesoamerican Agronomy*, 27(2), 265–275. <https://doi.org/https://doi.org/10.15517/am.v27i2.24361>

Suarez, J., Martín, G. J., Sotolongo, J. A., Rodríguez, E., Savran, V., Cepero, L., ... Machado, R. (2011). Experiencias del proyecto BIOMAS-CUBA. Alternativas energéticas a partir de la biomasa en el medio rural cubano. *Pastos y Forrajes*, 34(4), 473–496.

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIOREACTORES A ESCALA PILOTO

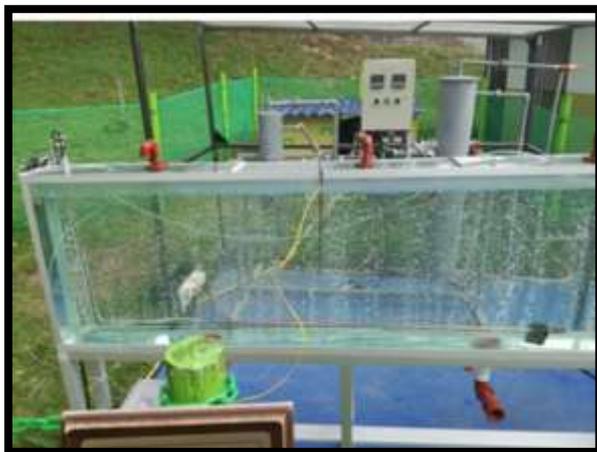
Subia, S. (2017). EVALUACIÓN DE BIOMASA DE MICROALGAS DE LA LAGUNA LIMONCOCHA COMO MATERIA PRIMA PARA LA OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES.

Vega, J. C., & Ramirez, S. (2014). *fuentes de energía renovable y no renovable aplicaciones.*

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

ANEXOS

A-1. Montaje del Fotobiorreactor de 200 Litros

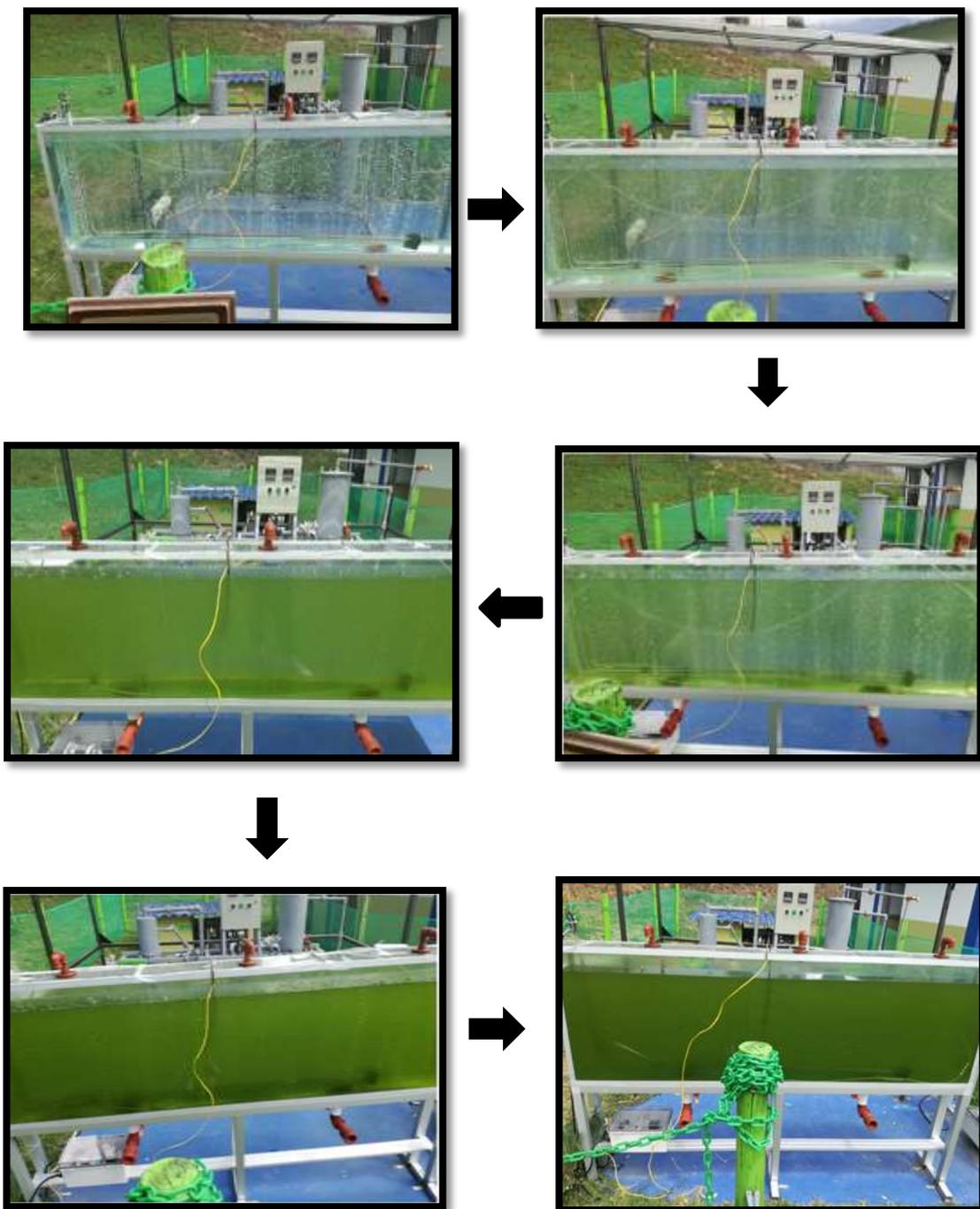


A-2. Fertilizante utilizado como medio de cultivo Bayfolan Bayer



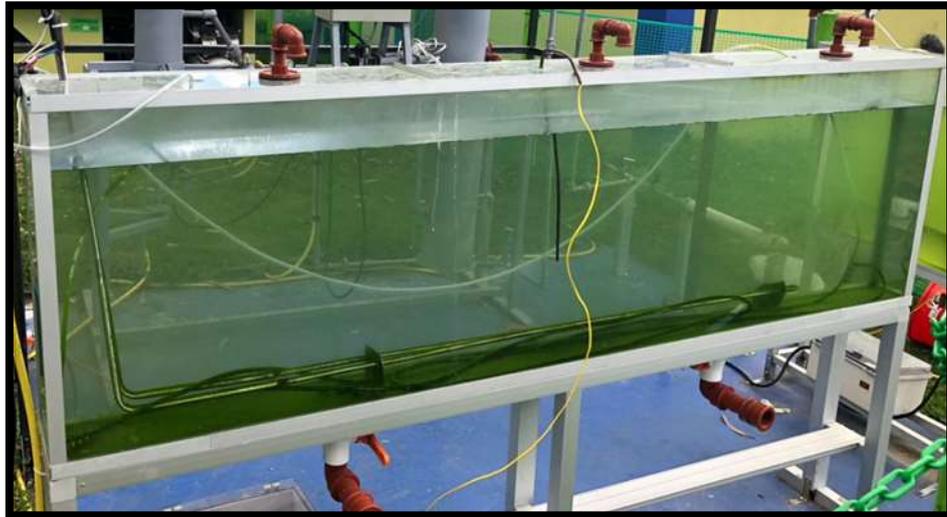
ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

A-2. Registro fotográfico del aumento de la densidad celular en el Fotobiorreactor



ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

A-3. Proceso de Clarificación después de las 4 horas de decantación



A-4. Proceso de ruptura celular equipo Vibrarcells



ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE MICROALGAS PARA BIOCOMBUSTIBLES EN FOTOBIORREACTORES A ESCALA PILOTO

A-5. Registro fotografico de la toma de voltaje y amperaje de los equipos con multmetro TRUPPER

